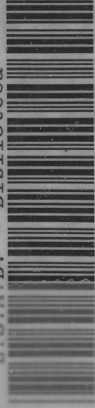


E.S.A.B. - Biblioteca



0000011330

# MECANICA DE LOS FLUIDOS E HIDRAULICA

TEORIA y  
75 problemas  
resueltos

RANALD V.  
GILES

UNIVERSITAT POLITÈCNICA CATALUNYA  
Biblioteca



1400480638

# Prólogo

Este libro ha sido concebido con el principal propósito de complementar los textos ordinarios (de mecánica de los fluidos e hidráulica. Se basa en la convicción del autor de que el esclarecimiento y comprensión de los principios fundamentales de cualquier rama de la mecánica se obtienen mejor mediante numerosos ejercicios ilustrativos.

La anterior edición de este libro ha sido acogida muy favorablemente. En esta segunda edición, muchos de los capítulos han sido revisados y adicionados con objeto de poner al día determinados temas de acuerdo con los más recientes conceptos, métodos y terminología. Se ha dedicado especial atención al análisis dimensional recogiendo los nuevos materiales en el Capítulo 5. La revisión más extensa se ha llevado a cabo en los capítulos que tratan los fundamentos del flujo de fluidos, flujo de fluidos en tuberías y flujo en canales abiertos.

La materia se divide en capítulos que abarcan áreas bien definidas de teoría y estudio. Cada capítulo se inicia con el establecimiento de las definiciones pertinentes, principios y teoremas, junto con el material ilustrativo y descriptivo al que sigue una serie de problemas resueltos y problemas propuestos. Los problemas resueltos ilustran y amplían la teoría, presentan métodos de análisis, proporcionan ejemplos prácticos e iluminan con aguda perspectiva aquellos aspectos de detalle que capacitan al estudiante para aplicar los principios fundamentales con corrección y seguridad. El análisis del cuerpo libre, los diagramas vectoriales, los principios de trabajo y energía de la cantidad de movimiento y las leyes de Newton se utilizan a lo largo de todo el libro. No se ha regateado esfuerzo para presentar problemas originales desarrollados por el autor en los largos años dedicados a la enseñanza de esta materia. Entre los problemas resueltos se incluyen numerosas demostraciones de teoremas y deducciones de fórmulas. El elevado número de problemas propuestos asegura un repaso completo del material de cada capítulo.

Los alumnos de las Escuelas de Ingeniería reconocerán la utilidad de este libro al estudiar la mecánica de los fluidos y, adicionalmente, aprovecharán la ventaja de su posterior empleo como libro de referencia en su práctica profesional. Encontrarán soluciones muy detalladas de numerosos problemas prácticos y, cuando lo necesiten, podrán recurrir siempre al resumen de la teoría. Asimismo, el libro puede servir al ingeniero profesional que ha de recordar esta materia cuando es miembro de un tribunal examinador o por cualesquiera otras razones.

Deseo expresar mi agradecimiento a mi colega Robert C. Stiefel, que ha comprobado cuidadosamente la solución de muchos de los nuevos problemas. También he de expresar mi gratitud a la redacción de la Schaum Publishing Company y, muy particularmente, a Henry Hayden y Nicola Miracapillo, por sus inestimables sugerencias e inapreciable cooperación.

RANALD V. GILES

# Tabla de materias

| Capítulo |   | Páginas   |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS</b>   | <b>1</b>  |
|          | La mecánica de los fluidos y la hidráulica. Definición de fluido. Sistema técnico de unidades. Peso específico. Densidad de un cuerpo. Densidad relativa de un cuerpo. Viscosidad de un fluido. Presión de vapor. Tensión superficial. Capilaridad. Presión de un fluido. La presión. Diferencia de presiones. Variaciones de la presión en un fluido compresible. Altura o carga de presión <i>h</i> . Módulo volumétrico de elasticidad ( <i>E</i> ). Compresión de los gases. Para condiciones isotérmicas. Para condiciones adiabáticas o isentrópicas. Perturbaciones en la presión. |           |
| <b>2</b> | <b>FUERZAS HIDROSTÁTICAS SOBRE LAS SUPERFICIES.....</b>   | <b>22</b> |
|          | Introducción. Fuerza ejercida por un líquido sobre un área plana. Tensión circunferencial o tangencial. Tensión longitudinal en cilindros de pared delgada.   |           |
| <b>3</b> | <b>EMPUJE Y FLOTACIÓN.....</b>  | <b>36</b> |
|          | Principio de Arquímedes. Estabilidad de cuerpos sumergidos y flotantes.   |           |
| <b>4</b> | <b>TRASLACIÓN Y ROTACIÓN DE MASAS LIQUIDAS.....</b>   | <b>42</b> |
|          | Introducción. Movimiento horizontal. Movimiento vertical. Rotación de masas fluidas. Recipientes abiertos. Rotación de masas fluidas. Recipientes cerrados.   |           |
| <b>5</b> | <b>ANÁLISIS DIMENSIONAL Y SEMEJANZA HIDRÁULICA.....</b>   | <b>50</b> |
|          | Introducción. Análisis dimensional. Modelos hidráulicos. Semejanza geométrica. Semejanza cinemática. Semejanza dinámica. La relación entre las fuerzas de inercia. Relación de las fuerzas de inercia a las de presión. Relación de las fuerzas de inercia a las viscosas. Relación de las fuerzas de inercia a las gravitatorias. Relación de las fuerzas de inercia a las elásticas. Relación de las fuerzas de inercia a la de tensión superficial. Relación de tiempos.   |           |
| <b>6</b> | <b>FUNDAMENTOS DEL FLUJO DE FLUIDOS.....</b>  | <b>70</b> |
|          | Introducción. Flujo de fluidos. Flujo permanente. Flujo uniforme. Líneas de corriente. Tubos de corriente. Ecuación de continuidad. Red de corriente. Ecuación de la energía. Altura de velocidad. Aplicación del teorema de Bernoulli. Línea de energías o de alturas totales. Línea de alturas piezométricas. Potencia.   |           |

TABLA DE MATERIAS

Páginas

Capítulo 7 FLUJO DE FLUIDOS EN TUBERÍAS. 96

Introducción. Flujo laminar. Velocidad crítica. Número de Reynolds. Flujo turbulento. Tensión cortante en la pared de una tubería. Distribución de velocidades. Pérdida de carga en flujo laminar. Fórmula de Darcy-Weisbach. Coeficiente de fricción. Otras pérdidas de carga.

Capítulo 8 SISTEMAS DE TUBERÍAS EQUIVALENTES, COMPUESTAS, EN PARALELO Y RAMIFICADAS. 115

Sistemas de tubejías. Sistemas de tuberías equivalentes. Sistemas de tuberías compuestas o en serie, en paralelo y ramificadas. Métodos de resolución. Fórmula de Hazen-Williams.

Capítulo 9 MEDIDAS EN FLUJO DE FLUIDOS. 133

Introducción. Tubo de Pitot. Coeficiente de descarga. Coeficiente de velocidad. Coeficiente de contracción. Pérdida de carga. Vertederos de aforo. Fórmula teórica de un vertedero. Fórmula de Francis. Fórmula de Bazin. Fórmula de Fteley y Stearns. Fórmula del vertedero triangular. La fórmula del vertedero trapezoidal. Para presas empleadas como vertederos. El tiempo de vaciado de depósitos. El tiempo para establecer el flujo.

Capítulo 10 FLUJO EN CANALES ABIERTOS. 160

Canal abierto. Flujo uniforme y permanente. Flujo no uniforme. Flujo laminar. La fórmula de Chezy. El coeficiente C. El caudal  $Q$ . La pérdida de carga. Distribución vertical de la velocidad. Energía específica. Profundidad crítica. Caudal unitario máximo. En canales no rectangulares y para un flujo crítico. Flujo no uniforme. Los vertederos de aforo de pared gruesa. Resalto hidráulico.

Capítulo // FUERZAS DESARROLLADAS POR LOS FLUIDOS EN MOVIMIENTO. 192

Introducción. El principio de impulso-cantidad de movimiento. El coeficiente de corrección de la cantidad de movimiento. Resistencia. Sustentación. Resistencia total. Coeficientes de resistencia. Coeficientes de sustentación. Número de Mach. Teoría de la capa límite. Placas planas. Golpe de ariete. Velocidades supersónicas.

Capítulo 12 MAQUINARIA HIDRÁULICA. 225

Maquinaria hidráulica. En el caso de rodetes. Ruedas hidráulicas, bombas y soplantes. Velocidad específica. Rendimiento. Cavitación. Propulsión por hélices. Los coeficientes de la hélice.



# TABLA DE MATERIAS

## APÉNDICES

Páginas

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| Tabla 1. | Propiedades aproximadas de algunos gases..  | 246       |
| 2.       | Densidad relativa y viscosidad cinemática de algunos líquidos. ....   | 247       |
| 3.       | Coefficiente de fricción / para agua solamente. ....  | 248       |
| 4.       | Pérdidas de carga en accesorios.....  | 249       |
| 5.       | Valores de $K^*$ . Contracciones y ensanchamientos.....   | 250       |
| 6.       | Algunos valores del coeficiente $C_L$ de Hazen-Williams.....  | 250       |
| 7.       | Coefficientes de desagüe para orificios circulares de arista viva.....  | 251       |
| 8.       | Algunos factores de expansión $Y$ para flujo.....   | 252       |
| 9.       | Algunos valores medios de $n$ empleados en las fórmulas de Kutter y de Manning y de $m$ en la fórmula de Bazin..... | Ma<br>252 |
| 10.      | Valores de $C$ de la fórmula de Kutter.....   | 253       |
| 11.      | Valores del factor de descarga $K$ para canales trapezoidales.....  | 254       |
| 12.      | Valores del factor de descarga $K'$ para canales trapezoidales.....   | 255       |
| 13.      | Áreas, de círculos.....   | 256       |
| 14.      | Pesos y dimensiones de tuberías de fundición.....   | 256       |

## DIAGRAMAS

|                |   |     |
|----------------|---|-----|
| Diagramas A-1. | Diagrama de Moody para coeficientes de fricción $f$ .....   | 257 |
| A-2.           | Diagrama de Moody modificado para coeficientes de fricción / (solución directa para el flujo $Q$ )..... | 258 |
| B.C.           | Nomograma de caudales, fórmula de Hazen-Williams ( $C = 100$ ).....                                     | 259 |
| D.             | Coefficiente para orificios medidores.....  | 260 |
| E.             | Coefficientes para boquillas de aforo.....  | 261 |
| F.             | Coefficientes para venturímetros.....   | 262 |
| G.             | Coefficiente de resistencia en función de $R_E$ .....   | 263 |
| H.             | Coefficientes de resistencia para placas planas y lisas.....  | 264 |
|                | Coefficientes de resistencia a velocidades supersónicas.....  | 265 |

|             |     |
|-------------|-----|
| ÍNDICE..... | 267 |
|-------------|-----|

## SIMBOLOS Y ABREVIATURAS

En la siguiente lista se da el significado de las letras empleadas en este libro. Por la limitación del alfabeto es imposible evitar la utilización de la misma letra para representar más de una magnitud. Como cada símbolo se define al introducirlo por primera vez, no existe confusión posible.

|                                     |   |                       |  |
|-------------------------------------|---|-----------------------|--|
| <i>a</i>                            | aceleración en m/seg <sup>2</sup> , área en m <sup>2</sup>  | hp                    | potencia en caballos de vapor (CV) = $\frac{WQH}{75}$  |
| <i>A</i>                            | área en m <sup>2</sup>  |                       |  |
| <i>b</i>                            | longitud de un vertedero en m, anchura en la superficie libre del agua en m, anchura de solera de un canal abierto en m               | <i>I</i>              | momento de inercia en m <sup>4</sup> o cm <sup>4</sup>   |
|                                     |   | <i>I<sub>xy</sub></i> | producto de inercia en m <sup>4</sup> o cm <sup>4</sup>  |
| <i>c</i>                            | coeficiente de desagüe o descarga, celeridad de la onda de presión en m/seg (velocidad del sonido)                                    | <i>k</i>              | relación de los calores específicos, exponente isentrópico (adiabático), constante de Von Karman                   |
|                                     |   | <i>K</i>              | coeficiente de desagüe en canales trapezoidales, coeficiente de pérdida de carga en ensanchamientos, constante     |
| <i>c<sub>c</sub></i>                | coeficiente de contracción  | <i>K<sub>c</sub></i>  | coeficiente de pérdida de carga en contracciones   |
| <i>c<sub>v</sub></i>                | coeficiente de velocidad  |                       |  |
| <i>C</i>                            | coeficiente de Chezy, constante de integración  |                       |  |
| <i>CG</i>                           | centro de gravedad  | <i>l</i>              | longitud de mezcla en m  |
| <i>C<sub>p</sub></i>                | centro de presión, coeficiente de potencia en hélices   | <i>L</i>              | longitud en m  |
|                                     |   | <i>L<sub>E</sub></i>  | longitud equivalente en m  |
| <i>C<sub>D</sub></i>                | coeficiente de arrastre o resistencia   | <i>m</i>              | coeficiente de rugosidad en la fórmula de Bazin, coeficiente de vertedero en presas                                |
| <i>C<sub>F</sub></i>                | coeficiente de empuje en hélices  | <i>M</i>              | masa en UTM (unidad técnica de masa) o kg seg <sup>2</sup> /m, peso molecular                                      |
| <i>C<sub>L</sub></i>                | coeficiente de sustentación   |                       |  |
| <i>C<sub>T</sub></i>                | coeficiente del par en hélices  | <i>n</i>              | coeficiente de rugosidad, exponente, coeficiente de rugosidad en las fórmulas de Kutter y de Manning               |
| <i>C<sub>1</sub></i>                | coeficiente de Hazen-Williams   |                       |  |
| cfs                                 | pies cúbicos por segundo  |                       |  |
| <i>d, D</i>                         | diámetro en m   | <i>N</i>              | velocidad de rotación en rpm   |
| <i>D<sub>1</sub></i>                | diámetro unitario en cm   | <i>N<sub>s</sub></i>  | velocidad específica en rpm  |
| <i>Dr</i>                           | densidad relativa   | <i>N<sub>u</sub></i>  | velocidad unitaria en rpm  |
| <i>e</i>                            | rendimiento   | <i>N<sub>F</sub></i>  | número de Froude   |
| <i>E</i>                            | módulo de elasticidad volumétrico en kg/m <sup>2</sup> , en kg/cm <sup>2</sup> o en kg/mm <sup>2</sup> , energía específica en kgm/kg | <i>N<sub>M</sub></i>  | número de Mach   |
|                                     |   | <i>N<sub>W</sub></i>  | número de Weber  |
| <i>f</i>                            | factor o coeficiente de rozamiento de Darcy en flujo en tuberías  | <i>p</i>              | presión en kg/m <sup>2</sup> , perímetro mojado en m   |
|                                     |   | <i>p'</i>             | presión en kg/cm <sup>2</sup>  |
| <i>F</i>                            | fuerza en kg, empuje en kg  | <i>P</i>              | fuerza en kg, potencia en kgm/seg  |
| <i>g</i>                            | aceleración de la gravedad = 9,81 m/seg <sup>2</sup> = 32,2 pies/seg <sup>2</sup>   | <i>P<sub>u</sub></i>  | potencia unitaria en kgm/seg   |
| gpm                                 | galones americanos por minuto   | psf                   | libras/pie <sup>2</sup> (lb/ft <sup>2</sup> )  |
| <i>h</i>                            | altura de carga en m, altura o profundidad en m, altura o carga de presión en m   | psia                  | libras/pulgada <sup>2</sup> (lb/in <sup>2</sup> ), absoluta. En el sistema técnico europeo kg/cm <sup>2</sup> (ab) |
| <i>H</i>                            | altura o carga total (energía por unidad de peso) en m o kgm/kg   | psig                  | lb/in <sup>2</sup> , manométrica. En el sistema técnico europeo simplemente kg/cm <sup>2</sup>                     |
| <i>H<sub>L</sub>, h<sub>L</sub></i> | pérdida de carga en m (algunas veces se designa por <i>LH</i> )   | <i>q</i>              | caudal por unidad de anchura en m <sup>3</sup> /seg por unidad de anchura  |
|                                     |   | <i>Q</i>              | caudal en volumen en m <sup>3</sup> /seg   |

# SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

|           |  |       |  |
|-----------|--|-------|--|
| $Q_u$     | descarga o caudal unitario en m <sup>3</sup> /seg  | $v_s$ | volumen específico = $1/w$ en m <sup>3</sup> /kg                   |
| $r$       | radio en m   | $v_*$ | velocidad de corte = $\sqrt{\tau/\rho}$ en m/seg                   |
| $r_o$     | radio de una tubería en m  | $V$   | velocidad media en m/seg (o como venga definida)                   |
| $R$       | constante de los gases, radio hidráulico en m  | $V_c$ | velocidad crítica en m/seg   |
| $R_E$     | número de Reynolds   | $w$   | peso específico en kg/m <sup>3</sup>                               |
| $S$       | pendiente de la línea de alturas piezométricas, pendiente de la línea de alturas totales                   | $W$   | peso en kg, caudal en peso = $wQ$ en kg/seg                        |
| $S_o$     | pendiente de la solera de un canal   | $x$   | distancia en m   |
| $t$       | tiempo en seg, espesor en cm, viscosidad en grados Saybolt   | $y$   | profundidad en m, distancia en m                                   |
| $T$       | temperatura, par en mkg, tiempo en seg   | $y_c$ | profundidad crítica en m   |
| $u$       | velocidad periférica de un elemento que está girando en m/seg  | $y_N$ | profundidad normal en m  |
| $u, v, w$ | componentes de la velocidad en las direcciones $X, Y$ y $Z$  | $Y$   | coeficientes de expansión en flujos compresibles                   |
| $v$       | volumen en m <sup>3</sup> , velocidad local en m/seg, velocidad relativa en maquinaria hidráulica en m/seg | $z$   | elevación, altura topográfica o cota (carga) en m                  |
|           |  | $Z$   | altura de la cresta de un vertedero sobre la solera del canal en m |

|                      |  |
|----------------------|--|
| $\alpha$ (alfa)      | ángulo, coeficiente de corrección de la energía cinética                     |
| $\beta$ (beta)       | ángulo, coeficiente de corrección de la cantidad de movimiento               |
| $\delta$ (delta)     | espesor de la capa límite en m   |
| $\Delta$ (delta)     | término correctivo del flujo   |
| $\epsilon$ (épsilon) | rugosidad superficial en cm  |
| $\eta$ (eta)         | viscosidad de remolino   |
| $\theta$ (theta)     | ángulo genérico  |
| $\mu$ (mi)           | viscosidad absoluta o dinámica en kg seg/m <sup>2</sup> (o en poises)        |
| $\nu$ (ni)           | viscosidad cinemática = $\mu/\rho$ en m <sup>2</sup> /seg (o en stokes)      |
| $\pi$ (pi)           | parámetro adimensional   |
| $\rho$ (ro)          | densidad = $w/g$ en kg seg <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> o UTM/m <sup>3</sup> |
| $\sigma$ (sigma)     | tensión superficial en kg/m, tensión o esfuerzo normal en kg/cm <sup>2</sup> |
| $\tau$ (tau)         | tensión o esfuerzo cortante o tangencial en kg/m <sup>2</sup>                |
| $\phi$ (fi)          | coeficiente de velocidad, potencial de velocidad, relación                   |
| $\psi$ (psi)         | función de corriente   |
| $\omega$ (omega)     | velocidad angular en rad/seg   |

## FACTORES DE CONVERSION

|   |   |
|---|---|
| 1 pie cúbico (ft <sup>3</sup> )                     | = 7,48 galones americanos = 28,32 litros  |
| 1 galón americano                                   | = 8,338 libras de agua a 60° F = 3,7854 litros  |
| 1 pie cúbico por segundo                            | = 0,646 millones de galones por día = 448,8 galones por minuto                              |
| 1 libra-segundo por pie cuadrado ( $\mu$ )          | = 478,7 poises = 4,88 kg seg/m <sup>2</sup>   |
| 1 poise   | = 1 g <sub>m</sub> /cm seg = 1/98,1 kg seg/m <sup>2</sup>                                   |
| 1 pie cuadrado por segundo ( $\nu$ )                | = 929 stokes (cm <sup>2</sup> /seg)   |
| 1 horsepower (HP)                                   | = 550 pie-libras por segundo = 0,746 kilovatios = 1,014 caballos de vapor (CV) = 76 kgm/seg |
| 1 caballo de vapor (CV)                             | = 75 kgm/seg = 0,736 kilovatios (kW) = 0,986 horsepower (HP)                                |
| 760 mm Hg   | = 30 pulgadas de mercurio (in Hg)   |
|   | = 34 pies de agua (ft H <sub>2</sub> O)   |
|   | = 14,7 libras por pulgada cuadrada (lb/in <sup>2</sup> )                                    |
|   | = 1,033 kg/cm <sup>2</sup> = 1 Atm (atmósfera física)                                       |
| 1 kg/cm <sup>2</sup>                                | = 1 at (atmósfera técnica) = 0,9678 Atm = 14,22 lb/in <sup>2</sup>                          |
| 1 libra por pie cuadrado (lb/ft <sup>2</sup> o psf) | = 4,88 kg/m <sup>2</sup>  |

# Capítulo 1

## Propiedades de los fluidos

### LA MECANICA DE LOS FLUIDOS Y LA HIDRAULICA

La rama de la mecánica aplicada que estudia el comportamiento de los fluidos ya sea en reposo o en movimiento constituye la mecánica de los fluidos y la hidráulica. En el desarrollo de los principios de la mecánica de los fluidos algunas de las propiedades de los fluidos juegan un papel preponderante, mientras que otras o influyen muy poco o nada. En la estática de los fluidos, el peso específico es la propiedad importante, mientras que en el flujo de fluidos la densidad y la viscosidad son las que predominan. Cuando tiene lugar una compresibilidad apreciable es necesario considerar los principios de la termodinámica. Al intervenir presiones manométricas negativas la tensión de vapor pasa a ser importante y la tensión superficial afecta a la estática o cinemática de los fluidos cuando las secciones de paso son pequeñas.

### DEFINICION DE FLUIDO

Los fluidos son sustancias capaces de «fluir» y que se adaptan a la forma de los recipientes que los contienen. Cuando están en equilibrio, los fluidos no pueden soportar fuerzas tangenciales o cortantes. Todos los fluidos son compresibles en cierto grado y ofrecen poca resistencia a los cambios de forma.

Los fluidos pueden dividirse en líquidos y gases. Las diferencias esenciales entre líquidos y gases son (a) los líquidos son prácticamente incompresibles y los gases son compresibles, por lo que en muchas ocasiones hay que tratarlos como tales y (b) los líquidos ocupan un volumen definido y tienen superficies libres mientras que una masa dada de gas se expande hasta ocupar todas las partes del recipiente que lo contenga.

### SISTEMA TECNICO DE UNIDADES

Las magnitudes fundamentales seleccionadas son la longitud, fuerza y tiempo. Las tres unidades fundamentales correspondientes son el metro para la longitud, el kilogramo fuerza (o kilogramo peso) y el segundo. Las otras unidades pueden deducirse a partir de éstas. Así, la unidad de volumen es el  $m^3$ , la unidad de la aceleración el  $m/seg^2$ , la de trabajo el  $kgm$  y la unidad de presión el  $kg/m^2$ . Algunos datos pueden venir dados en otras unidades y deben convertirse al sistema metro-kilogramo fuerza-segundo antes de aplicarlos a la solución de los problemas.

La unidad de masa en este sistema, la UTM (unidad técnica de masa), se establece a partir de las unidades de fuerza y de aceleración. Para un cuerpo que cae en el vacío la aceleración a que está sometido es la de la gravedad ( $g = 9.81 \text{ m/seg}^2$  al nivel del mar) y la única fuerza que actúa es su peso. A partir del segundo principio de Newton,

$$\text{fuerza en kg} = \text{masa en UTM} \times \text{aceleración en m/seg}^2$$

De aquí

$$\text{peso en kg} = \text{masa en UTM} \times g(9.81 \text{ m/seg}^2)$$

$$\text{o} \quad \text{masa } M \text{ en UTM} = \frac{\text{peso } W \text{ en kg}}{g(9.81 \text{ m/seg}^2)} \quad (1)$$

## PESO ESPECIFICO

El peso específico  $w$  de una sustancia es el peso de la unidad de volumen de dicha sustancia. En los líquidos,  $w$  puede considerarse constante para las variaciones ordinarias de presión. El peso específico del agua para las temperaturas más comunes es de  $1000 \text{ kg/m}^3$ . Véase el Apéndice, Tablas 1(C) y 2, para valores adicionales.

Los pesos específicos de los gases pueden calcularse mediante la *ecuación de estado* de los gases o

$$o \quad \frac{pv_s}{T} = R \quad \text{(leyes de Charles y Boyle)} \quad (2)$$

donde  $p$  es la presión absoluta en  $\text{kg/m}^2$ ,  $v_s$  el volumen específico o volumen ocupado por la unidad de peso en  $\text{m}^3/\text{kg}$ ,  $T$  la temperatura absoluta en grados Kelvin ( $^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273$ ) y  $R$  la *constante del gas* en  $\text{m}^3/\text{K}$ . Como  $w = 1/v_s$ , la ecuación anterior puede escribirse

$$w = \frac{p}{RT} \quad (3)$$

**DENSIDAD DE UN CUERPO**  $\rho$  (ro) = masa por unidad de volumen =  $w/g$ .

En el sistema técnico de unidades, la densidad del agua es  $1000/9,80665 = 101,972$  ( $\approx 102$ )  $\text{UTM/m}^3$  o  $\text{kg seg}^2/\text{m}^4$ . En el sistema cgs la densidad del agua es  $1 \text{ g/cm}^3$  a  $4^{\circ}\text{C}$ . Véase Apéndice, Tabla 1(C).

## DENSIDAD RELATIVA DE UN CUERPO

La densidad relativa de un cuerpo es un número adimensional que viene dado por la relación del peso del cuerpo al peso de un volumen igual de una sustancia que se toma como referencia. Los sólidos y líquidos se refieren al agua a  $4^{\circ}\text{C}$ , mientras que los gases se refieren al aire libre de  $\text{CO}_2$  e hidrógeno a  $0^{\circ}\text{C}$  y  $1 \text{ atm}$  de presión, como condiciones normales. Por ejemplo,

$$\begin{aligned} \text{densidad relativa de una sustancia} &= \frac{\text{peso de la sustancia}}{\text{peso de igual volumen de agua}} \\ &= \frac{\text{peso específico de la sustancia}}{\text{peso específico del agua}} \end{aligned} \quad (4)$$

Así, si la densidad relativa de un aceite es 0,750 su peso específico será  $0,750(1000 \text{ kg/m}^3) = 750 \text{ kg/m}^3$ .

La densidad relativa del agua es 1,00 y la del mercurio 13,57. La densidad relativa de una sustancia viene dada por el mismo número en cualquier sistema de unidades. Véase Apéndice, Tabla 2.

## VISCOSIDAD DE UN FLUIDO

La viscosidad de un fluido es aquella propiedad que determina la cantidad de resistencia opuesta a las fuerzas cortantes. La viscosidad se debe primordialmente a las interacciones entre las moléculas del fluido.

Con referencia a la Fig. 1-1, se consideran dos placas planas y paralelas de grandes dimensiones, separadas una pequeña distancia  $y$ , y con el espacio entre ellas lleno de un fluido. Se supone que la placa superior se mueve a una velocidad constante  $U$  al actuar sobre ella

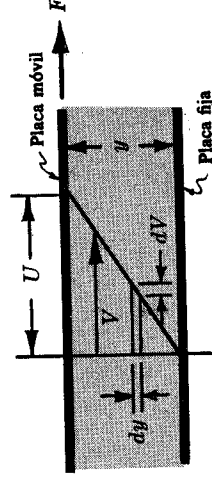


Fig. 1-1

una fuerza  $F$ , también constante. El fluido en contacto con la placa móvil se adhiere a ella moviéndose a la misma velocidad  $U$ , mientras que el fluido en contacto con la placa fija permanecerá en reposo. Si la separación  $y$  y la velocidad  $U$  no son muy grandes, la variación de las velocidades (gradiente) vendrá dada por una línea recta. La experiencia ha demostrado que la fuerza  $F$  varía con el área de la placa, con la velocidad  $U$  e inversamente con la separación  $y$ . Como por triángulos semejantes,  $U/y = dV/dy$ , tenemos

$$F \propto \frac{AU}{y} = A \frac{dV}{dy} \quad \text{o} \quad \frac{F}{A} = \tau \propto \frac{dV}{dy}$$

donde  $\tau = F/A$  = tensión o esfuerzo cortante. Al introducir la constante de proporcionalidad  $\mu$  (mi), llamada *viscosidad absoluta o dinámica*,

$$\tau = \mu \frac{dV}{dy} \quad \text{o} \quad \mu = \frac{\tau}{dV/dy} \quad (5)$$

Las unidades de  $\mu$  son  $\frac{\text{kg seg}}{\text{m}^2}$ , ya que  $\frac{\text{kg/m}^2}{(\text{m/seg})/\text{m}} = \frac{\text{kg seg}}{\text{m}^2}$ . Los fluidos que siguen la relación (5) se llaman *fluidos newtonianos* (véase Problema 9).

Otro coeficiente de viscosidad, llamado *viscosidad cinemática*, viene definido por

$$\text{viscosidad cinemática } \nu \text{ (ni)} = \frac{\text{viscosidad absoluta } \mu}{\text{densidad}}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu}{w/g} = \frac{\mu g}{w} \quad (6)$$

Las unidades de  $\nu$  son  $\frac{\text{m}^2}{\text{seg}}$ , ya que  $\frac{(\text{kg seg/m}^2)(\text{m/seg}^2)}{\text{kg/m}^3} = \frac{\text{m}^2}{\text{seg}}$ .

Las viscosidades en los manuales vienen dadas normalmente en poises y stokes (unidades del sistema cgs) y en ocasiones en grados o segundos Saybolt, a partir de medidas en viscosímetros. Algunas conversiones de un sistema a otro de unidades se dan en los Problemas 6-8. En las Tablas 1 y 2 del Apéndice se dan algunos valores de viscosidades.

En los líquidos la viscosidad disminuye al aumentar la temperatura, pero no se ve afectada apreciablemente por las variaciones de presión. La viscosidad absoluta de los gases aumenta al aumentar la temperatura, pero casi no varía con la presión. Como el peso específico de los gases varía con la presión (a temperatura constante), la viscosidad cinemática es inversamente proporcional a la presión. Sin embargo, de la ecuación anterior,  $\mu g = w\nu$ .

## PRESION DE VAPOR

Cuando tiene lugar el fenómeno de la evaporación dentro de un espacio cerrado, la presión parcial a que dan lugar las moléculas de vapor se llama presión de vapor. Las presiones de vapor dependen de la temperatura, aumentando con ella. En la Tabla 1(C) se dan valores para el agua.

## TENSION SUPERFICIAL

Una molécula en el interior de un líquido está sometida a la acción de fuerzas atractivas en todas las direcciones, siendo la resultante nula. Pero si la molécula está en la superficie del líquido, sufre la acción de un conjunto de fuerzas de cohesión, cuya resultante es perpendicular a la superficie. De aquí que sea necesario consumir cierto trabajo para mover las moléculas hacia la superficie venciendo la resistencia de estas fuerzas, por lo que las moléculas superficiales tienen más energía que las interiores.

La tensión superficial de un líquido es el trabajo que debe realizarse para llevar moléculas en número suficiente desde el interior del líquido hasta la superficie para crear una nueva unidad de super-



ficie ( $\text{kgm/m}^2$ ). Este trabajo es numéricamente igual a la fuerza tangencial de contracción que actuara sobre una línea hipotética de longitud unidad situada en la superficie ( $\text{kg/m}$ ).

En la mayoría de los problemas presentados en las mecánicas de fluidos elementales la tensión superficial no es de particular importancia. En la Tabla 1(C) se dan valores de la tensión superficial  $\sigma$  (sigma) para el agua en contacto con el aire.

### CAPILARIDAD

La elevación o descenso de un líquido en un tubo capilar (o en situaciones físicas análogas, tales como en medios porosos) vienen producidos por la tensión superficial, dependiendo de las magnitudes relativas de la cohesión del líquido y de la adhesión del líquido a las paredes del tubo. Los líquidos ascienden en tubos que mojan (adhesión > cohesión) y descienden en tubos a los que no mojan (cohesión > adhesión). La capilaridad tiene importancia en tubos de diámetros aproximadamente menores de 10 mm.

### PRESION DE UN FLUIDO

La presión de un fluido se transmite con igual intensidad en todas las direcciones y actúa normalmente a cualquier superficie plana. En el mismo plano horizontal, el valor de la presión en un líquido es igual en cualquier punto. Las medidas de presión se realizan con los manómetros, que pueden ser de diversas formas. De no advertir lo contrario, a través de todo el libro las presiones serán las presiones relativas o manométricas. La presión manométrica representa el valor de la presión con relación a la presión atmosférica.

**LA PRESION** viene expresada por una fuerza dividida por una superficie. En general,

$$p \text{ (kg/m}^2\text{)} = \frac{dP \text{ (kg)}}{dA \text{ (m}^2\text{)}}$$

Cuando la fuerza  $P$  actúa uniformemente distribuida sobre una superficie, tenemos

$$p \text{ (kg/m}^2\text{)} = \frac{P \text{ (kg)}}{A \text{ (m}^2\text{)}} \quad \text{y} \quad p' \text{ (kg/cm}^2\text{)} = \frac{P \text{ (kg)}}{A \text{ (cm}^2\text{)}}$$

### DIFERENCIA DE PRESIONES

La diferencia de presiones entre dos puntos a distintos niveles en un líquido viene dada por,

$$p_2 - p_1 = w(h_2 - h_1) \quad \text{en kg/m}^2 \quad (7)$$

donde  $w$  = peso específico de líquido ( $\text{kg/m}^3$ ) y  $h_2 - h_1$  = diferencia en elevación (m).

Si el punto 1 está en la superficie libre del líquido y  $h$  es positiva hacia abajo, la ecuación anterior se transforma en

$$p = wh \quad [\text{en kg/m}^2 \text{ (man)}] \quad (8)$$

Para obtener la presión en  $\text{kg/cm}^2$ ,

$$p' = \frac{p}{10^4} = \frac{wh}{10^4} \quad [\text{en kg/cm}^2 \text{ (man)}] \quad (9)$$

Estas ecuaciones son aplicables en tanto que  $w$  se mantenga constante (o varía tan ligeramente con  $h$ , que no introduzca un error significativo en el resultado).

## VARIACIONES DE LA PRESION EN UN FLUIDO COMPRESIBLE

Las variaciones de presión en un fluido compresible son, por lo general, muy pequeñas ya que los pesos específicos son pequeños, como también lo son las diferencias en elevación consideradas en la mayoría de los cálculos en la hidráulica. Cuando se han de tener en cuenta para pequeñas diferencias en elevación  $dh$ , la ley de variación de la presión puede escribirse en la forma

$$dp = -w dh \quad (10)$$

El signo negativo indica que la presión disminuye al aumentar la altitud, con  $h$  positiva hacia arriba. En los Problemas 29-31 se dan aplicaciones de esta fórmula.

## ALTURA O CARGA DE PRESION $h$

La altura de presión  $h$  representa la altura de una columna de fluido homogéneo que dé la presión dada. Así

$$h \text{ (m de fluido)} = \frac{p \text{ (kg/m}^2\text{)}}{w \text{ (kg/m}^3\text{)}} \quad (11)$$

## MODULO VOLUMETRICO DE ELASTICIDAD ( $E$ )

El módulo volumétrico de elasticidad expresa la compresibilidad de un fluido. Es la relación de la variación de presión a la variación de volumen por unidad de volumen.

$$E = \frac{dp'}{-dv/v} = \frac{\text{kg/cm}^2}{\text{m}^3/\text{m}^3} = \text{kg/cm}^2 \quad (12)$$

## COMPRESION DE LOS GASES

La compresión de los gases puede tener lugar de acuerdo con diversas leyes de termodinámica. Para la misma masa de gas sujeta a dos estados diferentes,

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2} = WR \quad \text{y} \quad \frac{p_1}{w_1 T_1} = \frac{p_2}{w_2 T_2} = R \quad (13)$$

donde  $p$  = presión absoluta en  $\text{kg/m}^2$ ,  $v$  = volumen en  $\text{m}^3$ ,  $W$  = peso en  $\text{kg}$ ,

$w$  = peso específico en  $\text{kg/m}^3$ ,  $R$  = constante del gas en  $\text{m}^2/\text{°K}$ ,

$T$  = temperatura absoluta en grados Kelvin ( $^{\circ}\text{C} + 273$ ).

**PARA CONDICIONES ISOTERMICAS** (temperatura constante) la expresión anterior (13) se transforma en

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 \quad \text{y} \quad \frac{w_1}{w_2} = \frac{p_1}{p_2} = \text{constante} \quad (14)$$

También

$$\text{Módulo volumétrico } E = p \text{ (en kg/m}^2\text{)} \quad (15)$$

**PARA CONDICIONES ADIABATICAS O ISOENTROPICAS** (sin intercambio de calor) las expresiones anteriores se convierten en

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k \quad \text{y} \quad \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^k = \frac{p_1}{p_2} = \text{constante} \quad (16)$$

También 
$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k-1)/k} \quad (17)$$

y 
$$\text{Módulo volumétrico } E = kp \text{ (en kg/m}^2\text{)} \quad (18)$$

donde  $k$  es la relación de calores específicos a presión constante y a volumen constante. Se le llama también exponente adiabático.

La Tabla 1(A) del Apéndice da algunos valores típicos de  $R$  y  $k$ . Para muchos gases, el producto de  $R$  por el peso molecular es aproximadamente 848.

## PERTURBACIONES EN LA PRESION

Cualquier perturbación en la presión de un fluido se propaga en forma de ondas. Estas ondas de presión se mueven a una velocidad igual a la de propagación del sonido a través del fluido. La velocidad de propagación o celeridad, en m/seg, viene dada por

$$c = \sqrt{E/\rho} \quad (19)$$

donde  $E$  viene medido en kg/m<sup>2</sup>. Para los gases, la velocidad de sonido es

$$c = \sqrt{kp/\rho} = \sqrt{kgRT} \quad (20)$$

## Problemas resueltos

1. Calcular el peso específico  $w$ , el volumen específico  $v_s$  y la densidad  $\rho$  del metano a 38° C y 8,50 kg/cm<sup>2</sup> de presión absoluta.

**Solución:**

De la Tabla 1(A) del Apéndice,  $R = 53$ .

$$\text{Peso específico } w = \frac{p}{RT} = \frac{8,5 \times 10^4}{53(273 + 38)} = 5,16 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Volumen específico } v_s = \frac{1}{w} = \frac{1}{5,16} = 0,194 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{Densidad } \rho = \frac{w}{g} = \frac{5,16}{9,81} = 0,527 \text{ UTM/m}^3$$

2. Si 6 m<sup>3</sup> de un aceite pesan 5080 kg, calcular su peso específico  $w$ , densidad  $\rho$  y densidad relativa.

**Solución:**

$$\text{Peso específico } w = \frac{5080 \text{ kg}}{6 \text{ m}^3} = 848 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Densidad } \rho = \frac{w}{g} = \frac{848 \text{ kg/m}^3}{9,81 \text{ m/seg}^2} = 86,5 \text{ UTM/m}^3$$

$$\text{Densidad relativa} = \frac{w_{ac}}{w_{ag}} = \frac{848}{1000} = 0,848$$

3. A  $32^\circ\text{C}$  y  $2,10\text{ kg/cm}^2$ , el volumen específico  $v_s$  de cierto gas es  $0,71\text{ m}^3/\text{kg}$ . Determinar la constante del gas  $R$  y su densidad  $\rho$ .

**Solución:**

$$\text{Como } w = \frac{p}{RT}, R = \frac{p}{wT} = \frac{pv_s}{T} = \frac{(2,10 \times 10^4)(0,71)}{273 + 32} = 68,8.$$

$$\text{Densidad } \rho = \frac{w}{g} = \frac{1/v_s}{g} = \frac{1}{v_s g} = \frac{1}{0,71 \times 9,81} = 0,1436 \text{ UTM/m}^3$$

4. (a) Determinar la variación de volumen de  $1\text{ m}^3$  de agua a  $27^\circ\text{C}$  al aumentar la presión en  $21\text{ kg/cm}^2$ .  
 (b) A partir de los siguientes datos experimentales determinar el módulo de elasticidad volumétrico del agua: a  $35\text{ kg/cm}^2$  el volumen era de  $30\text{ dm}^3$  y a  $250\text{ kg/cm}^2$  de  $29,70\text{ dm}^3$ .

**Solución:**

- (a) De la Tabla 1(C) del Apéndice,  $E$  a  $27^\circ\text{C}$  es de  $22,90 \times 10^3\text{ kg/cm}^2$ . Mediante la fórmula (12),

$$dv = -\frac{v}{E} dp' = -\frac{1 \times 21 \times 10^4}{22,9 \times 10^7} = -9,15 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

- (b) La definición asociada con la fórmula (12) indica que las variaciones *correspondientes* en la presión y volumen son las que deben considerarse en la fórmula. De aquí, un aumento en la presión se corresponde con una disminución de volumen.

$$E = -\frac{dp'}{dv/v} = -\frac{(250 - 35) \times 10^4}{(29,70 - 30) \times 10^3/30 \times 10^3} = 21,50 \times 10^7 \text{ kg/m}^2$$

5. Un cilindro contiene  $356\text{ dm}^3$  de aire a  $49^\circ\text{C}$  y una presión absoluta de  $2,80\text{ kg/cm}^2$ . Se comprime el aire hasta  $70\text{ dm}^3$ . (a) Suponiendo condiciones isotérmicas, ¿cuál es la presión en el nuevo volumen y cuál el módulo de elasticidad volumétrico? (b) Al suponer condiciones adiabáticas, ¿cuál es la presión final, la temperatura final y el módulo de elasticidad volumétrico?

**Solución:**

- (a) Para condiciones isotérmicas,

$$p_1 v_1 = p_2 v_2$$

De aquí,

$$2,80 \times 10^4 \times 0,356 = p_2' \times 10^4 \times 0,070 \quad \text{y } p_2' = 14,20 \text{ kg/cm}^2 \text{ (ab)}$$

El módulo volumétrico  $E = p' = 14,20\text{ kg/cm}^2$ .

- (b) Para condiciones adiabáticas,  $p_1 v_1^k = p_2 v_2^k$  y la Tabla 1(A) del Apéndice da  $k = 1,40$ . De aquí,

$$2,80 \times 10^4 (0,356)^{1,40} = p_2' \times 10^4 (0,070)^{1,40} \quad \text{y } p_2' = 27,22 \text{ kg/cm}^2 \text{ (ab)}.$$

La temperatura final se obtiene a partir de la ecuación (17):

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{(k-1)/k}, \quad \frac{T_2}{273 + 49} = \left(\frac{27,22}{2,80}\right)^{0,40/1,40}, \quad T_2 = 616^\circ\text{K} = 343^\circ\text{C}$$

El módulo volumétrico  $E = kp' = 1,40 \times 27,22 = 38,10\text{ kg/cm}^2$ .

6. De las International Critical Tables, la viscosidad del agua a  $20^\circ\text{C}$  es  $0,01008$  poises. Calcular (a) la viscosidad absoluta en  $\text{kg seg/m}^2$ . (b) Si la densidad relativa a  $20^\circ\text{C}$  es  $0,998$ , calcular el valor de la viscosidad cinemática en  $\text{m}^2/\text{seg}$ .

**Solución:**

El poise está medido en dinas  $\text{seg/cm}^2$ . Como  $1\text{ kg} = 9,81 \times 10^5$  dinas y  $1\text{ m} = 100\text{ cm}$ , obtenemos

$$1 \frac{\text{kg seg}}{\text{m}^2} = \frac{9,81 \times 10^5 \text{ dinas seg}}{10^4 \text{ cm}^2} = 98,1 \text{ poises}$$

- (a)  $\mu$  en  $\text{kg seg/m}^2 = 0,01008/98,1 = 10,28 \times 10^{-5}$
- (b)  $\nu$  en  $\text{m}^2/\text{seg} = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu g}{w/g} = \frac{10,28 \times 10^{-5} \times 9,81}{0,998 \times 1000} = 1,01 \times 10^{-5}$

7. Hallar la viscosidad cinemática de un líquido cuya viscosidad absoluta es de 15,14 poises y su densidad relativa 0,964 dando el resultado en  $\text{m}^2/\text{seg}$ .

**Solución:**

Procediendo como en el Problema 6,

$$\nu = \frac{15,14 \times 9,81}{98,1 \times 964} = 1,57 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg}.$$

8. Convertir una viscosidad de 510 segundos Saybolt a  $15,5^\circ \text{C}$  en viscosidad cinemática  $\nu$  en  $\text{m}^2/\text{seg}$ .

**Solución:**

Cuando para la determinación se ha utilizado un viscosímetro universal Saybolt, para la conversión se utiliza uno de los dos grupos de fórmulas siguientes:

- (a) para  $t \leq 100$ ,  $\mu$  en poises =  $(0,00226t - 1,95/t) \times \text{densidad relativa}$   
 para  $t > 100$ ,  $\mu$  en poises =  $(0,00220t - 1,35/t) \times \text{densidad relativa}$
- (b) para  $t \leq 100$ ,  $\nu$  en stokes =  $(0,00226t - 1,95/t)$   
 para  $t > 100$ ,  $\nu$  en stokes =  $(0,00220t - 1,35/t)$

donde  $t$  mide los segundos Saybolt. Para convertir stokes ( $\text{cm}^2/\text{seg}$ ) en  $\text{m}^2/\text{seg}$  solo es necesario dividir por  $10^4$ .

Mediante el segundo grupo (b) de fórmulas, ya que  $t > 100$ ,  $\nu = (0,00220 \times 510 - \frac{1,35}{510}) \times 10^{-4}$   
 $= 1,1194 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{seg}.$

9. Estudiar las características de velocidad de deformación bajo esfuerzo cortante, que se representan para diversos tipos de fluidos en la Figura 1-2.

**Solución:**

- (a) Los fluidos newtonianos se comportan de acuerdo con la ley  $\tau = \mu(dV/dy)$ , o bien que la tensión cortante es proporcional al gradiente de velocidades o velocidad de deformación tangencial. Por tanto, para éstos fluidos, la gráfica de la tensión cortante en función del gradiente de velocidades es una línea recta que pasa por el origen. La pendiente de esta recta determina la viscosidad.
- (b) En un fluido «ideal» la resistencia a la deformación cortante o tangencial es nula, de aquí que su gráfica coincida con el eje de abscisas. Aunque los fluidos ideales no existen, en ciertos análisis está justificada y es útil la hipótesis de fluido ideal.
- (c) Para un sólido rígido «ideal» no hay deformación bajo ningún estado de carga, y la gráfica coincide con el eje y de ordenadas. Los sólidos reales sufren siempre alguna deformación y, dentro del límite de proporcionalidad (ley de Hooke), la gráfica es una línea recta casi vertical.
- (d) Los fluidos no newtonianos se deforman de manera que la tensión cortante no es proporcional a la velocidad de deformación tangencial, excepto quizá a tensiones cortantes muy pequeñas. La deformación de estos fluidos pudiera clasificarse como plástica.
- (e) Los materiales plásticos «ideales» pueden soportar cierta cantidad de esfuerzo cortante sin deformarse, y a partir de un cierto valor de aquél se deforman con una velocidad proporcional a la tensión cortante.

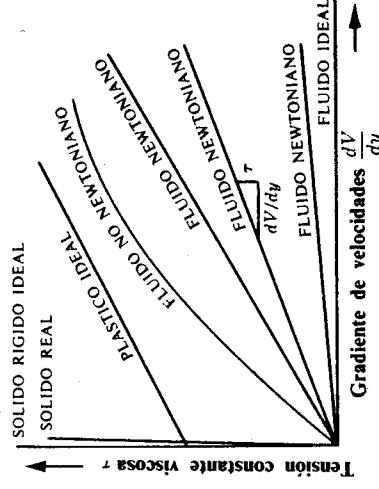


Fig. 1-2

10. Con referencia a la Fig. 1-3, el fluido tiene una viscosidad absoluta de  $4,88 \times 10^{-3} \text{ kg seg/m}^2$  y una densidad relativa de 0,913. Calcular el gradiente de velocidades y el módulo de la tensión cortante en el contorno y en los puntos situados a 25 mm, 50 mm y 75 mm del contorno, suponiendo (a) una distribución de velocidades lineal y (b) una distribución de velocidades parabólica. La parábola en el diámetro tiene su vértice en A. El origen está en B.

**Solución:**

- (a) Para la hipótesis de distribución lineal, la relación entre la velocidad y la distancia  $y$  es  $V = 15y$ . De aquí  $dV = 15 dy$ , y el gradiente de velocidades es  $dV/dy = 15$ .

Para  $y = 0$ ,  $V = 0$ ,  $dV/dy = 15 \text{ seg}^{-1}$  y

$$\tau = \mu(dV/dy) = 4,88 \times 10^{-3} \times 15 = 7,32 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^2$$

Análogamente, para los otros valores de  $y$ , también se obtiene  $\tau = 7,32 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^2$ .

- (b) La ecuación de la parábola debe satisfacer la condición de que la velocidad sea cero en el contorno B. La ecuación de la parábola es  $V = 1,125 - 200(0,075 - y)^2$ . Luego  $dV/dy = 400(0,075 - y)$  y la tabulación de los resultados conduce a lo siguiente:

| $y \times 10^3$ | $V$   | $dV/dy$ | $\tau = 4,88 \times 10^{-3}(dV/dy)$ |
|-----------------|-------|---------|-------------------------------------|
| 0               | 0     | 30      | 0,1464 kg/m <sup>2</sup>            |
| 25              | 0,625 | 20      | 0,0976 kg/m <sup>2</sup>            |
| 50              | 1,000 | 10      | 0,0488 kg/m <sup>2</sup>            |
| 75              | 1,125 | 0       | 0                                   |

Se observará que en los puntos en que el gradiente de velocidades es nulo (cosa que ocurre en el eje de las tuberías en conducción forzada, como se verá más adelante) la tensión cortante es cero.

Las unidades del gradiente de velocidades son  $\text{seg}^{-1}$  y el producto  $\mu(dV/dy) = (\text{kg seg/m}^2)(\text{seg}^{-1}) = \text{kg/m}^2$ , dimensiones correctas de la tensión cortante  $\tau$ .

11. Un cilindro de 12 cm de radio gira concéntricamente en el interior de un cilindro fijo de 12,6 cm de radio. Ambos cilindros tienen una longitud de 30 cm. Determinar la viscosidad del líquido que llena el espacio entre los cilindros, si se necesita un par de 9,0 cm kg para mantener una velocidad angular de 60 revoluciones por minuto.

**Solución:**

- (a) El par se transmite al cilindro exterior a través de la capa de fluido. Como el espaciado entre los cilindros es pequeño, los cálculos pueden realizarse sin integración.

Velocidad tangencial del cilindro interior =  $rw = (0,12 \text{ m})(2\pi \text{ rad/seg}) = 0,755 \text{ m/seg}$ .

En el pequeño espacio entre los cilindros puede suponerse lineal el gradiente de velocidades y utilizar el radio medio. Así,  $dV/dy = 0,755/(0,120 - 0,126) = 125,8 \text{ (m/seg)/m}$  o  $\text{seg}^{-1}$

Par aplicado = par resistente

$$0,09 = \tau(\text{área})(\text{brazo}) = \tau(2\pi \times 0,123 \times 0,30)(0,123) \quad y \quad \tau = 3,15 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{De aquí, } \mu = \tau/(dV/dy) = 3,15/125,7 = 0,02500 \text{ kg seg/m}^2$$

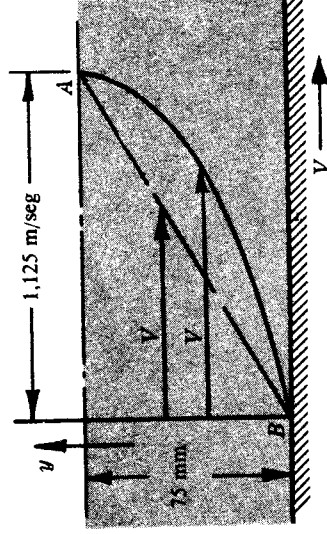


Fig. 1-3



- (b) En un método matemático más exacto se utiliza el cálculo como sigue:

Como antes,  $0,09 = \tau(2\pi r \times 0,30)r$ , de donde  $\tau = 0,0476/r^2$ .

Ahora bien,  $\frac{dV}{dy} = \frac{\tau}{\mu} = \frac{0,0476}{\mu r^2}$ , donde las variables son la velocidad  $V$  y el radio  $r$ . La velocidad es

cero en el radio mayor e igual a 0,755 m/seg en el radio menor.

Ordenando la expresión anterior y sustituyendo  $-dr$  por  $dy$  (el signo menos indica que  $r$  disminuye cuando  $y$  aumenta), se obtiene

$$\int_{V_{\text{ex}}}^{V_{\text{in}}} dV = \frac{0,0476}{\mu} \int_{1,126}^{0,120} \frac{-dr}{r^2} \quad \text{y} \quad V_{\text{in}} - V_{\text{ex}} = \frac{0,0476}{\mu} \left[ \frac{1}{r} \right]_{0,120}^{1,126}$$

Por tanto,  $(0,755 - 0) = \frac{0,0476}{\mu} \left( \frac{1}{0,120} - \frac{1}{0,126} \right)$ , de donde  $\mu = 0,02500 \text{ kg seg/m}^2$ .

12. Demostrar que la presión en un punto es la misma en todas las direcciones.

**Solución:**

Considérese un pequeño prisma triangular de líquido en reposo, bajo la acción del fluido que lo rodea. Los valores medios de la presión sobre las tres superficies son  $p_1$ ,  $p_2$  y  $p_3$ . En la dirección  $z$ , las fuerzas son iguales y opuestas y se anulan entre ellas.

Sumando las fuerzas en las direcciones  $x$  e  $y$  se obtiene

$$\Sigma X = 0, \quad P_2 - P_3 \text{ sen } \theta = 0$$

$$\text{o} \quad p_2(dy \, dz) - p_3(ds \, dz) \text{ sen } \theta = 0$$

$$\Sigma Y = 0, \quad P_1 - P_3 \cos \theta - dW = 0$$

$$\text{o} \quad p_1(dx \, dz) - p_3(ds \, dz) \cos \theta - w(\tfrac{1}{2} dx \, dy \, dz) = 0$$

Como  $dy = ds \text{ sen } \theta$  y  $dx = ds \cos \theta$ , las ecuaciones se reducen a las siguientes:

$$p_2 \, dy \, dz - p_3 \, dy \, dz = 0 \quad \text{o} \quad p_2 = p_3 \quad (1)$$

$$\text{y} \quad p_1 \, dx \, dz - p_3 \, dx \, dz - w(\tfrac{1}{2} dx \, dy \, dz) = 0 \quad \text{o} \quad p_1 - p_3 - w(\tfrac{1}{2} dy) = 0 \quad (2)$$

Cuando el prisma tiende a contraerse sobre un punto,  $dy$  tiende a cero en el límite, y la presión media se vuelve uniforme en la superficie que tiende a cero y queda definida la presión en un punto. Por tanto, al poner  $dy = 0$  en la ecuación (2) se obtiene  $p_1 = p_3$  y de aquí  $p_1 = p_2 = p_3$ .

13. Deducir la expresión  $(p_2 - p_1) = w(h_2 - h_1)$ .

**Solución:**

Considérese una porción de líquido  $AB$  (Fig. 1-5) como un cuerpo libre de sección recta transversal  $dA$  que se mantiene en equilibrio bajo la acción de su propio peso y la acción de las otras partículas de líquido sobre el cuerpo  $AB$ .

En  $A$  la fuerza que actúa es  $p_1 \, dA$  (la presión en  $\text{kg/m}^2$  por el área en  $\text{m}^2$ ); en  $B$  es  $p_2 \, dA$ . El peso del cuerpo libre  $AB$  es  $W = wv = wL \, dA$ . Las otras fuerzas que actúan sobre el cuerpo libre  $AB$  son normales a sus lados, de las que se muestran solo unas pocas en la figura. Al establecer  $\Sigma X = 0$ , dichas fuerzas normales no es necesario considerarlas en la ecuación. Por consiguiente,

$$p_2 \, dA - p_1 \, dA - wL \, dA \text{ sen } \theta = 0$$

Como  $L \text{ sen } \theta = h_2 - h_1$ , la ecuación anterior se reduce a  $(p_2 - p_1) = w(h_2 - h_1)$ .

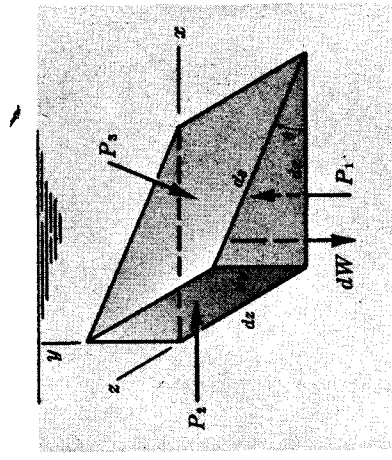


Fig. 1-4

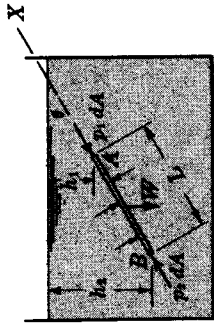


Fig. 1-5

14. Determinar la presión en  $\text{kg/cm}^2$  sobre una superficie sumergida a 6 m de profundidad en una masa de agua.

**Solución:**

Utilizando el valor medio de  $1000 \text{ kg/m}^3$  para  $w$ ,

$$p' = \frac{wh}{10^4} = \frac{1000 \times 6}{10^4} = 0,60 \text{ kg/cm}^2 \text{ (man)}$$

15. Determinar la presión en  $\text{kg/cm}^2$  a una profundidad de 9 m en un aceite de densidad relativa de 0,750.

**Solución:**

$$p' = \frac{wh}{10^4} = \frac{(0,750 \times 1000)9}{10^4} = 0,675 \text{ kg/cm}^2 \text{ (man)}$$

16. Encontrar la presión absoluta en  $\text{kg/cm}^2$  en el Problema 14 si la lectura barométrica es de 75,6 cm de mercurio (densidad relativa 13,57).

**Solución:**

$$\begin{aligned} \text{Presión absoluta} &= \text{presión atmosférica} + \text{presión debida a los 6 m de agua} \\ &= \frac{(13,57 \times 1000)(0,756)}{10^4} + \frac{1000 \times 6}{10^4} = 1,628 \text{ kg/cm}^2 \text{ (ab)} \end{aligned}$$

17. ¿A qué profundidad de un aceite, de densidad relativa 0,750, se producirá una presión de  $2,80 \text{ kg/cm}^2$ ? ¿A cuál si el líquido es agua?

**Solución:**

$$h_{ac} = \frac{p}{w_{ac}} = \frac{2,80 \times 10^4}{0,750 \times 1000} = 37,30 \text{ m}, \quad h_{ag} = \frac{p}{w_{ag}} = \frac{2,80 \times 10^4}{1000} = 28,00 \text{ m}$$

18. (a) Convertir una altura de presión de 5 m de agua en altura de aceite, de densidad relativa 0,750.  
(b) Convertir una altura de presión de 60 cm de mercurio en altura de aceite, de densidad relativa 0,750.

**Solución:**

$$(a) \quad h_{ac} = \frac{h_{ag}}{\text{den. rel. aceite}} = \frac{5}{0,750} = 6,33 \text{ m} \quad (b) \quad h_{ac} = \frac{h_{ag}}{\text{den. rel. aceite}} = \frac{13,57 \times 0,60}{0,750} = 10,85 \text{ m}$$

19. Preparar un gráfico de forma que puedan compararse fácilmente las presiones manométricas (man) y absolutas (ab) con las limitaciones que se harán notar.

**Solución:**

Sea A un punto, Fig. 1-6, a una presión absoluta de  $3,85 \text{ kg/cm}^2$ . La presión manométrica dependerá de la presión atmosférica reinante. Si tal presión es la atmosférica normal al nivel del mar ( $1,033 \text{ kg/cm}^2$ ), la presión manométrica en A será  $3,850 - 1,033 = 2,817 \text{ kg/cm}^2$ . La lectura barométrica más corriente equivale a una presión de  $1,014 \text{ kg/cm}^2$ , con lo que la presión manométrica obtenida sería  $3,850 - 1,014 = 2,836 \text{ kg/cm}^2$  (man).

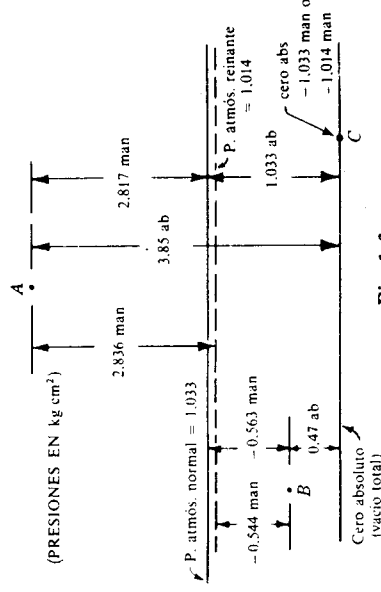


Fig. 1-6

Sea  $B$  un punto a una presión absoluta de  $0,47 \text{ kg/cm}^2$ . Este valor viene representado gráficamente por debajo de la presión atmosférica normal  $1,033 \text{ kg/cm}^2$  y la presión manométrica para  $B$  será  $0,470 - 1,033 = -0,563 \text{ kg/cm}^2$  (man). Si la presión atmosférica reinante es de  $1,014 \text{ kg/cm}^2$ , la presión manométrica para este valor será  $0,470 - 1,014 = -0,544 \text{ kg/cm}^2$  (man).

Sea  $C$  un punto a una presión absoluta igual a cero. Esta condición es equivalente a una presión manométrica «normal» negativa de  $-1,033 \text{ kg/cm}^2$  y a una presión manométrica, representativa del valor más corriente, de  $-1,014 \text{ kg/cm}^2$ .

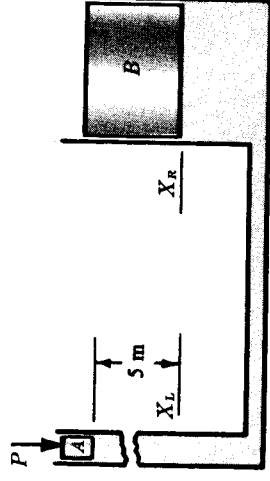
Las conclusiones que se pueden sacar son importantes. Las presiones manométricas negativas no pueden exceder de un límite teórico de la presión manométrica reinante o del valor normal de  $-1,033 \text{ kg/cm}^2$ . Las presiones absolutas no pueden tomar valores negativos.

20. Con referencia a la Fig. 1-7, las áreas del pistón  $A$  y del cilindro  $B$  son, respectivamente, de  $40$  y  $4000 \text{ cm}^2$  y  $B$  pesa  $4000 \text{ kg}$ . Los depósitos y las conducciones de conexión están llenos de aceite de densidad relativa  $0,750$ . ¿Cuál es la fuerza  $P$  necesaria para mantener el equilibrio si se desprecia el peso de  $A$ ?

**Solución:**

Se determina primero la presión que actúa sobre  $A$ . Como  $X_L$  y  $X_R$  están al mismo nivel en la misma masa de líquido, se tiene

Fig. 1-7



$$\text{presión en } X_L \text{ en kg/cm}^2 = \text{presión en } X_R \text{ en kg/cm}^2$$

$$\text{o presión bajo } A + \text{presión debida a los } 5 \text{ m de aceite} = \frac{\text{peso de } B}{\text{área de } B}$$

Sustituyendo,

$$p'_A + \frac{wh}{10^4} = \frac{4000 \text{ kg}}{4000 \text{ cm}^2}$$

$$p'_A + \frac{750 \times 5}{10^4} \text{ kg/cm}^2 = 1,0 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{y} \quad p'_A = 0,625 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Fuerza } P = \text{presión uniforme} \times \text{área} = 0,625 \text{ kg/cm}^2 \times 40 \text{ cm}^2 = 25,0 \text{ kg}.$$

21. Determinar la presión manométrica en  $A$  en  $\text{kg/cm}^2$  debida a la columna de mercurio (den. rel.  $13,57$ ) en el manómetro en U mostrado en la Figura 1-8.

**Solución:**

$B$  y  $C$  están al mismo nivel y en el mismo líquido, el mercurio; por tanto, podemos igualar las presiones en  $B$  y  $C$  en  $\text{kg/m}^2$  (man).

Presión en  $B$  = presión en  $C$

$$p_A + wh \text{ (para el agua)} = p_B + wh \text{ (para el mercurio)}$$

$$p_A + 1000(3,60 - 3,00) = 0 + (13,57 \times 1000)(3,80 - 3,00)$$

$$\text{Al despejar, } p_A = 10,256 \text{ kg/m}^2 \text{ y } p'_A = 10,256/10^4 = 1,0256 \text{ kg/cm}^2 \text{ (man).}$$

Otro procedimiento de resolución consiste en emplear las alturas de presión en metros de agua, lo que conduce por lo general a menos operaciones aritméticas, como se ve a continuación:

Altura de presión en  $B$  = altura de presión en  $C$

$$p_A/w + 0,60 \text{ m de agua} = 0,80 \times 13,57 \text{ m de agua}$$

$$\text{Al despejar } p_A/w = 10,256 \text{ m de agua y } p'_A = (1000 \times 10,256)/10^4 = 1,0256 \text{ kg/cm}^2 \text{ (man), como antes.}$$

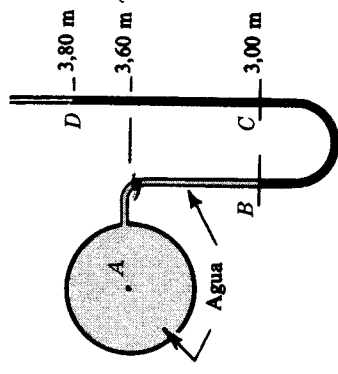


Fig. 1-8

22. Aceite de densidad relativa 0,750 está fluyendo a través de la boquilla mostrada en la Fig. 1-9 y , desequilibra la columna de mercurio del manómetro en U. Determinar el valor de  $h$  si la presión en  $A$  es de 1,40 kg/cm<sup>2</sup>.

**Solución:**

Presión en  $B =$  presión en  $C$

o, al utilizar como unidad kg/cm<sup>2</sup>,  $p'_A + \frac{wh}{10^4}$  (aceite) =  $p'_D + \frac{wh}{10^4}$  (mercurio)

$$1,40 + \frac{(0,750 \times 1000)(0,825 + h)}{10^4} = \frac{(13,57 \times 1000)h}{10^4} \quad \text{y} \quad h = 1,14 \text{ m}$$

**Otro método:**

Al utilizar ahora como unidad la altura de presión en m de agua,

Altura de presión en  $B =$  altura de presión en  $C$

$$\frac{1,40 \times 10^4}{1000} - (0,825 - h)0,750 = 13,57h \quad \text{y} \quad h = 1,14 \text{ m, como antes}$$

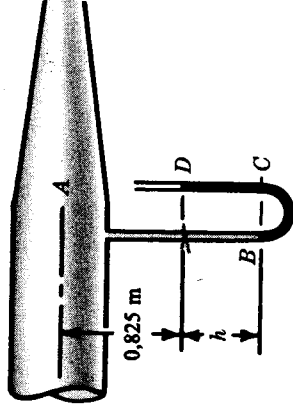


Fig. 1-9

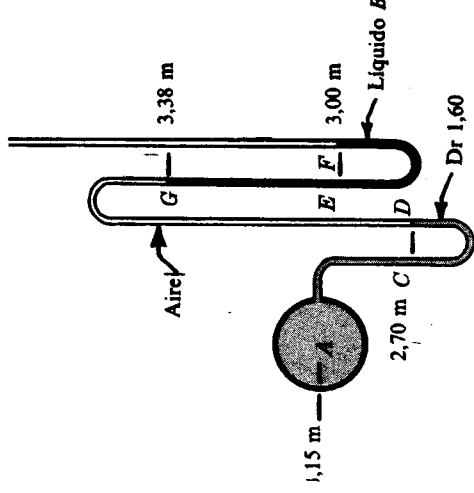


Fig. 1-10

23. Para una presión manométrica en  $A$  de  $-0,11$  kg/cm<sup>2</sup>, encontrar la densidad relativa ( $Dr$ ) del líquido manométrico  $B$  de la Figura 1-10.

**Solución:**

o, en kg/m<sup>2</sup>,

$$\begin{aligned} \text{Presión en } C &= \text{presión en } D \\ p_A - wh &= p_D \\ -0,11 \times 10^4 + (1,60 \times 1000)0,45 &= p_D = -380 \text{ kg/m}^2 \end{aligned}$$

Ahora bien,  $p_G = p_D = -380$  kg/m<sup>2</sup>, ya que el peso de los 0,68 m de aire pueden despreciarse sin error apreciable. Además  $p_E = p_F = 0$  en kg/m<sup>2</sup> (man).

Por tanto, presión en  $G =$  presión en  $E =$  presión en  $F =$  presión en  $D = (3,38 - 3,00)$  m del líquido manométrico

$$\begin{aligned} p_G &= p_E - (Dr \times 1000)(3,38 - 3,00) \\ -380 &= 0 - (Dr \times 1000)0,38 \quad \text{y} \quad Dr = 1,00 \end{aligned}$$

24. Para una lectura manométrica en  $A$  de  $-0,18 \text{ kg/cm}^2$ , determinar (a) la elevación en las ramas abiertas de los piezómetros  $E$ ,  $F$  y  $G$  y (b) la lectura del manómetro en  $U$  de mercurio de la Figura 1-11.

**Solución:**

- (a) Como el peso específico del aire (aproximadamente  $1,28 \text{ kg/m}^3$ ) es muy pequeño comparado con el de los líquidos, la presión en la elevación de  $15 \text{ m}$  puede considerarse igual a  $-0,18 \text{ kg/cm}^2$  sin introducir error apreciable en los cálculos.

**Para la columna E:**

Supuesta la elevación de  $L$ , como la mostrada, se tiene

$$\text{en } \text{kg/m}^2 \text{ (man)} \quad p_K = p_L$$

Por tanto,

$$p_H + wh = 0$$

$$\text{o bien} \quad -0,18 \times 10^4 + (0,700 \times 1000)h = 0$$

$$\text{y } h = 2,57 \text{ m.}$$

De aquí, la elevación de  $L$  será  $15,00 - 2,57 = 12,43 \text{ m}$ .

**Para la columna F:**

Presión en  $\text{El. } 12 \text{ m} = \text{presión en } \text{El. } 15 \text{ m} + \text{presión del líquido de Dr } 0,700$

$$= -0,18 + \frac{(0,700 \times 1000)(15 - 12)}{10^4} = 0,03 \text{ kg/cm}^2$$

que debe ser igual a la presión en  $M$ . Por tanto, la altura de presión en  $M$  será  $\frac{0,03 \times 10^4}{1000} = 0,30 \text{ m}$  de agua, y la columna  $F$  ascenderá  $0,30 \text{ m}$  por encima de  $M$  o bien la elevación en  $N$  es igual a  $12,30 \text{ m}$ .

**Para la columna G:**

Presión en  $\text{El. } 8 \text{ m} = \text{presión en } \text{El. } 12 \text{ m} + \text{presión de } 4 \text{ m de agua}$

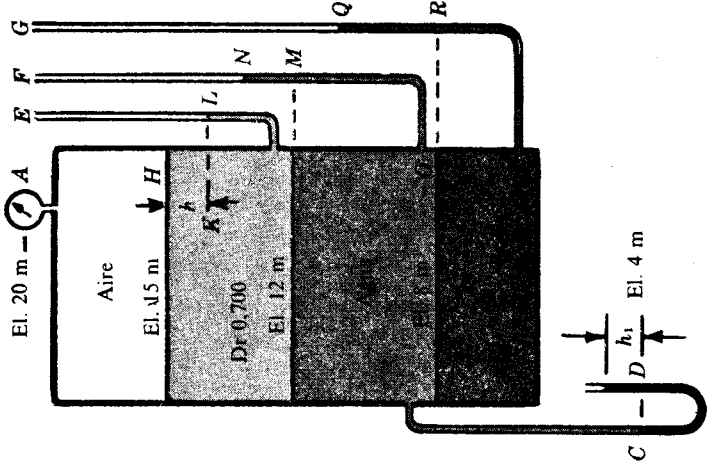
$$\text{o bien,} \quad p_o = 0,03 + \frac{1000 \times 4}{10^4} = 0,43 \text{ kg/cm}^2$$

que debe ser igual a la presión en  $R$ . Por tanto, la altura de presión en  $R$  será  $\frac{0,43 \times 10^4}{1,600 \times 1000} = 2,69 \text{ m}$  del líquido y la columna  $G$  ascenderá  $2,69 \text{ m}$  sobre  $R$  o hasta una elevación de  $10,69 \text{ m}$  en  $Q$ .

- (b) Para el manómetro de tubo en  $U$ , al utilizar como unidades metros de agua, altura de presión en  $D =$  altura de presión en  $C$ .

$$\begin{aligned} 13,57h_1 &= \text{altura de presión en } \text{El. de } 12 \text{ m} + \text{altura de presión de } 8 \text{ m de agua} \\ 13,57h_1 &= 0,30 + 8,00 \end{aligned}$$

de donde  $h_1 = 0,61 \text{ m}$ .



**Fig. 1-11**

25. Un manómetro diferencial está unido a dos secciones rectas  $A$  y  $B$  de una tubería horizontal por la que circula agua. La lectura en el manómetro de mercurio es de 0,60 m, siendo el nivel más cercano a  $A$  el más bajo. Calcular la diferencia de presiones entre  $A$  y  $B$  en  $\text{kg/cm}^2$ . Véase la Figura 1-12.

**Solución:**

*Nota:* Un croquis o dibujo ayuda a esclarecer el análisis de todos los problemas y a reducir las equivocaciones. Aun un simple diagrama de una línea puede servir.

Altura de presión en  $C$  = altura de presión en  $D$

o, al utilizar como unidad el m de agua,  $p_A/w - z = [p_B/w - (z + 0,60)] + 13,57(0,60)$

De aquí,  $p_A/w - p_B/w = \text{diferencia en alturas de presión} = 0,60(13,57 - 1) = 7,54 \text{ m de agua}$   
y  $p'_A - p'_B = (7,54 \times 1000)/10^4 = 0,754 \text{ kg/cm}^2$ .

Si  $(p'_A - p'_B)$  fuera negativa, la interpretación correcta del signo sería que la presión en  $B$  era  $0,754 \text{ kg/cm}^2$  mayor que la presión en  $A$ .

Los manómetros diferenciales deben ser purgados del aire de todos los tubos antes de tomar lecturas.

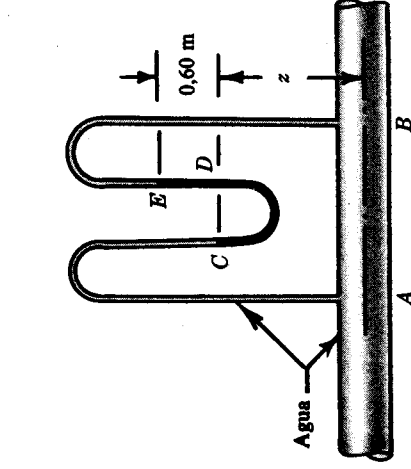


Fig. 1-12

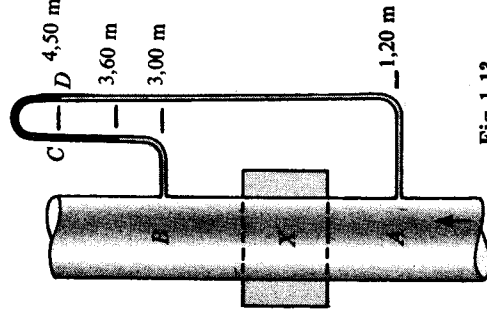


Fig. 1-13

26. Se quiere medir la pérdida de carga a través del dispositivo  $X$  mediante un manómetro diferencial cuyo líquido manométrico tiene una densidad relativa de 0,750. El líquido que circula tiene una densidad relativa de 1,50. Hallar la caída en altura de presión entre  $A$  y  $B$  a partir de la lectura manométrica en el aceite, mostrada en la Figura 1-13.

**Solución:**

Presión en  $C$  en  $\text{kg/m}^2$  = presión en  $D$  en  $\text{kg/m}^2$

$$p_B - (1,50 \times 1000)0,60 - (0,750 \times 1000)0,90 = p_A - (1,50 \times 1000)3,30$$

De aquí,  $p_A - p_B = 3375 \text{ kg/m}^2$  y la diferencia en alturas de presión =  $\frac{3375}{w} = \frac{3375}{1,50 \times 1000} = 2,25 \text{ m de líquido}$ .

**Otro método:**

Al utilizar como unidad el m de líquido ( $D_r = 1,50$ ),

altura de presión en  $C$  = altura de presión en  $D$

$$\frac{p_B}{w} - 0,60 - \frac{0,750 \times 0,90}{1,50} = \frac{p_A}{w} - 3,30$$

De aquí,  $p_A/w - p_B/w = \text{diferencia en alturas de presión} = 2,25 \text{ m de líquido}$ , como antes.



27. Los recipientes *A* y *B* contienen agua a las presiones respectivas de 2,80 y 1,40 kg/cm<sup>2</sup>. ¿Cuál es la lectura en el manómetro diferencial de mercurio, mostrado en la Figura 1-14?

**Solución:**

Altura de presión en *C* = altura de presión en *D*

$$\frac{2,80 \times 10^4}{1000} + x + h = \frac{1,40 \times 10^4}{1000} - y + 13,57h \quad (\text{en m de agua})$$

Ordenando,  $(10^4/1000)(2,80 - 1,40) + x + y = (13,57 - 1)h$ . Al sustituir  $x + y = 2,00$  m y despejar se obtiene  $h = 1,27$  m.

El lector habrá observado que empleando como unidades el kg/m<sup>2</sup> o el kg/cm<sup>2</sup> se hacen más operaciones aritméticas, pero como la probabilidad de cometer errores de concepto es menor se recomienda el uso de tales unidades en lugar de las alturas de presión.

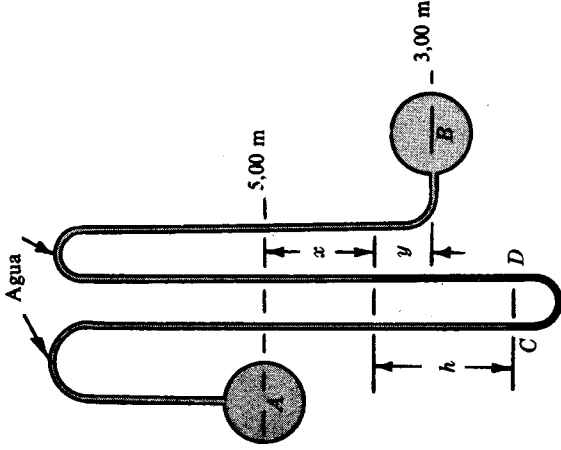


Fig. 1-14

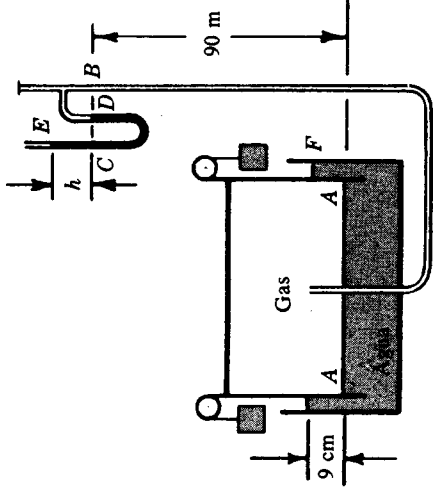


Fig. 1-15

28. La altura de presión al nivel *A-A* es de 0,09 m de agua y los pesos específicos del gas y del aire son, respectivamente, 0,560 y 1,260 kg/m<sup>3</sup>. Determinar la lectura en el manómetro de agua de tubo en U, que mide la presión del gas al nivel *B*, según se muestra en la Figura 1-15.

**Solución:**

Se supone que tanto el peso específico del aire como el del gas permanecen constantes en los 90 m de diferencia en elevación. Como los pesos específicos del gas y del aire son del mismo orden de magnitud, debe tenerse en cuenta el cambio en la presión atmosférica, con la altitud. Se utilizarán presiones absolutas.

$$\begin{aligned} (\text{absoluta}) p_C &= (\text{absoluta}) p_D \quad (\text{kg/m}^2) \\ (\text{atmosférica}) p_E + 1000h &= (\text{absoluta}) p_A - 0,560 \times 90 \quad (A) \end{aligned}$$

Se calcula ahora la presión absoluta en *A* en función de la presión atmosférica en *E*, obteniendo primero la presión atmosférica en *F* y luego *p<sub>A</sub>*.

$$(\text{absoluta}) p_A = [(\text{atmos.}) p_E + 1,260(h + 90 - 0,09)] + 0,09 \times 1000 \quad (\text{kg/m}^2)$$

Sustituyendo este valor en (A), eliminando *p<sub>E</sub>* y despreciando los términos muy pequeños, se obtiene

$$1000h = 90(1,260 - 0,560) + 0,09(1000) \quad y \quad h = 0,153 \text{ m de agua}$$

29. ¿Cuál es la presión en el océano a una profundidad de 1500 m, suponiendo (a) que el agua salada es incompresible y (b) el agua del mar es compresible y tiene un peso específico en la superficie de  $1025 \text{ kg/m}^3$ ?  $E = 21.000 \text{ kg/cm}^2$  (constante).

**Solución:**

(a) Presión  $p = wh = 1025 \times 1500 = 15,375 \times 10^5 \text{ kg/m}^2$  (man).

(b) Como la masa no varía al comprimirla ni su peso,  $dW = 0$ ; de aquí

$$dW = d(wv) = w dv + v dw = 0 \quad \text{o} \quad -dv/v = -dw/w \quad (A)$$

De las ecuaciones (10) y (12),  $dp = -w dh$  y  $dv/v = -dp/E$ . Sustituyendo en (A),

$$dp/E = dw/w \quad (B)$$

Integrando,  $p = E \log_e w + C$ . En la superficie,  $p = p_o$ ,  $w = w_o$ ; de aquí,  $C = p_o - E \log_e w_o$  y

$$p = E \log_e w + p_o - E \log_e w_o \quad \text{o} \quad (p - p_o) = E \log_e (w/w_o) \quad (C)$$

Poniendo  $dp = -w dh$  en (B),  $-\frac{w dh}{E} = \frac{dw}{w}$  o  $dh = -\frac{E dw}{w^2}$ . Integrando,

$$h = E/w + C_1 \quad (D)$$

En la superficie,  $h = 0$ ,  $w = w_o$ ; entonces,  $C_1 = -E/w_o$ ,  $h = (E/w - E/w_o)$  y, por tanto,

$$w = \frac{w_o E}{w_o h + E} = \frac{(1025)(21.000 \times 10^4)}{(1025)(-1500) + (21.000 \times 10^4)} = 1032,6 \text{ kg/m}^3$$

recordando que  $h$  es positiva hacia arriba y dando  $E$  en  $\text{kg/m}^2$

$$p = (21.000 \times 10^4) \log_e (1032,6/1025) = 15,476 \times 10^5 \text{ kg/m}^2 \text{ (man)}$$

30. Calcular la presión barométrica en  $\text{kg/cm}^2$  a una altitud de 1200 m si la presión al nivel del mar es de  $1,033 \text{ kg/cm}^2$ . Supónganse condiciones isotérmicas a  $21^\circ \text{ C}$ .

**Solución:**

El peso específico del aire a  $21^\circ \text{ C}$  es  $w = \frac{p}{29,3(273 + 21)}$ . Por tanto, de la ecuación (10),

$$dp = -w dh = -\frac{p}{29,3(294)} dh \quad \text{o} \quad \frac{dp}{p} = -0,000116 dh \quad (A)$$

Integrando (A),  $\log_e p = -0,000116h + C$ , donde  $C$  es la constante de integración.

Para calcular  $C$ : cuando  $h = 0$ ,  $p = 1,033 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$  (ab). De aquí,  $C = \log_e (1,033 \times 10^4)$  y

$$\log_e p = -0,000116h + \log_e (1,033 \times 10^4) \quad \text{o} \quad 0,000116h = \log_e (1,033 \times 10^4/p) \quad (B)$$

Pasando (B) a logaritmos decimales

$$2,3026 \log (1,033 \times 10^4/p) = 0,0001/6(1200),$$

$$\log (1,033 \times 10^4/p) = 0,06045, \quad 1,033 \times 10^4/p = \text{antilog } 0,06045 = 1,14935$$

$$\text{de la cual } p = \frac{1,033 \times 10^4}{1,14935} = 9,0 \times 10^3 \text{ kg/m}^2 = 0,90 \text{ kg/cm}^2.$$

31. Deducir la expresión general que da la relación entre la presión y la elevación, cuando las condiciones son isotérmicas, mediante  $dp = -w dh$ .

**Solución:**

Para condiciones isotérmicas, la ecuación  $\frac{p}{wT} = \frac{p_o}{w_o T_o}$  se transforma en  $\frac{p}{w} = \frac{p_o}{w_o}$  o  $w = w_o \frac{p}{p_o}$ .

Por tanto,  $dh = -\frac{dp}{w} = -\frac{p_o}{w_o} \times \frac{dp}{p}$ . Integrando,  $\int_{h_o}^h dh = -\frac{p_o}{w_o} \int_{p_o}^p \frac{dp}{p}$  y

$$h - h_o = -\frac{p_o}{w_o} (\log_e p - \log_e p_o) = +\frac{p_o}{w_o} (\log_e p_o - \log_e p) = \frac{p_o}{w_o} \log_e \frac{p_o}{p}$$

En realidad, la temperatura de la atmósfera disminuye con la altitud. De aquí, que una solución exacta requiera el conocimiento de las variaciones de la temperatura con la altitud para utilizar la ley de los gases  $p/wT = \text{constante}$ .

32. Desarrollar una expresión que relacione la presión manométrica  $p$  que reina en el interior de una gota de líquido y la tensión superficial  $\sigma$ .

**Solución:**

La tensión superficial que actúa sobre la superficie de una gota de líquido da lugar a que la presión en el interior de la gota sea superior a la presión exterior.

La Fig. 1-16 muestra las fuerzas que producen el equilibrio en la dirección  $X$  de media gota de diámetro  $d$ . Las fuerzas  $\sigma dL$  se deben a la tensión superficial que actúa sobre el perímetro y las fuerzas  $dP_x$  son las componentes en la dirección  $X$  de las fuerzas  $p dA$  (véase Capítulo 2). Por tanto, de  $\Sigma X = 0$ ,

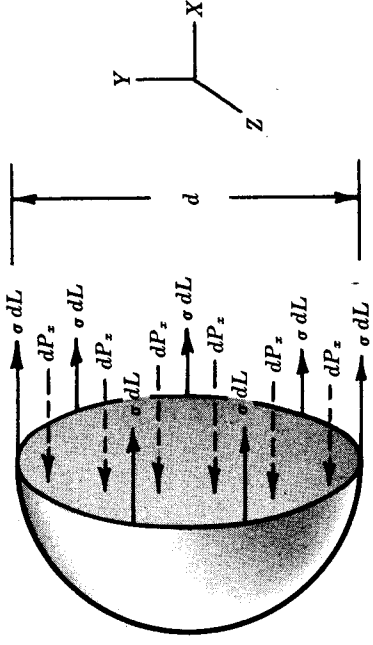


Fig. 1-16

suma de fuerzas hacia la derecha = suma de fuerzas hacia la izquierda

$$\sigma \int dL = \int dP_x$$

tensión superficial  $\times$  perímetro = presión  $\times$  proyección del área

$$\sigma(\pi d) = p(\pi d^2/4)$$

o  $p = 4\sigma/d$  en  $\text{kg/m}^2$  (man). Las unidades de la tensión superficial son  $\text{kg/m}$ .

Se observa que cuanto menor es la gota, mayor es la presión.

33. Una pequeña gota de agua a  $27^\circ \text{C}$  está en contacto con el aire y tiene un diámetro de 0,50 mm. Si la presión en el interior de la gota es  $5,80 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^2$  mayor que la atmosférica, ¿cuál es el valor de la tensión superficial?

**Solución:**

$$\sigma = \frac{1}{4}pd = \frac{1}{4}(58) \text{ kg/m}^2 \times (0,5 \times 10^{-3}) \text{ m} = 0,029 \text{ kg/m}$$

34. Calcular la altura aproximada a la que ascenderá un líquido que moja el vidrio en un tubo capilar en contacto con la atmósfera.

**Solución:**

La elevación en un tubo de diámetro pequeño puede calcularse aproximadamente considerando como cuerpo libre la masa de líquido  $ABCD$  que se muestra en la Figura 1-17.

Como  $\Sigma Y$  debe ser igual a cero, se obtiene

componentes verticales de las fuerzas debidas a la tensión superficial — peso del volumen  $ABCD$  hacia abajo + fuerza de la presión sobre  $AB$  hacia arriba — fuerza de la presión sobre  $CD$  hacia abajo = 0.

$$+ (\sigma \int dL) \sin \alpha - w(\pi d^2/4 \times h) + p(\text{área } AB) - p(\text{área } CD) = 0$$

Se ve que las presiones en los niveles  $AB$  y  $CD$  son iguales ambas a la atmosférica. Por tanto, los dos últimos términos del primer miembro se anulan entre sí y, como  $\sigma \int dL = \sigma(\pi d)$ , se obtiene

$$h = \frac{4\sigma \sin \alpha}{wd} \quad \text{en metros}$$

Para un mojado total, como ocurre con el agua en contacto con vidrio muy limpio, el ángulo  $\alpha$  es prácticamente  $90^\circ$ . No puede garantizarse una mayor aproximación.

En los trabajos experimentales, para evitar errores de consideración debidos a la capilaridad deben utilizarse tubos de diámetro de aproximadamente 10 mm o mayores.

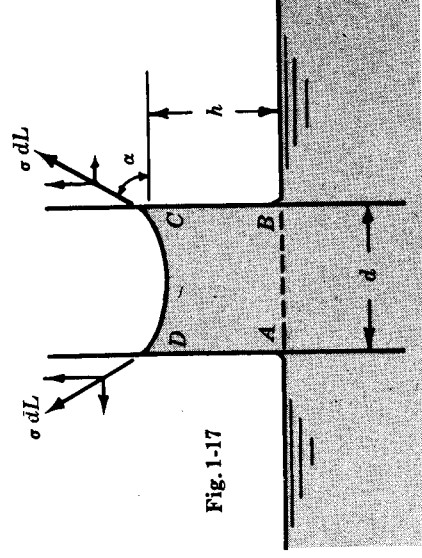


Fig. 1-17

35. Calcular la altura a la que ascenderá en un tubo capilar, de 3,00 mm de diámetro, agua a  $21^\circ\text{C}$ .

**Solución:** De la Tabla 1(C),  $\sigma = 0,00740\text{ kg/m}$ . Suponiendo un ángulo  $\alpha = 90^\circ$ , supuesto el tubo limpio,

$$h = \frac{4\sigma}{wd} = \frac{4 \times 0,00740\text{ kg/m}}{1000\text{ kg/m}^3 \times 3 \times 10^{-3}\text{ m}} = 0,0099\text{ m} = 9,90\text{ mm}.$$

## Problemas propuestos

36. Si la densidad de un líquido es de  $85\text{ UTM/m}^3$ , determinar su peso específico y su densidad relativa.  
*Sol.*  $834\text{ kg/m}^3$ ,  $0,834$
37. Comprobar los valores de la densidad y del peso específico del aire a  $30^\circ\text{C}$  dados en la Tabla 1(B).
38. Comprobar los valores de los pesos específicos del anhídrido carbónico y del nitrógeno dados en la Tabla 1(A).
39. ¿A qué presión tendrá el aire un peso específico de  $1,910\text{ kg/m}^3$  si la temperatura es de  $50^\circ\text{C}$ ?  
*Sol.*  $1,80\text{ kg/cm}^2$  (ab)
40. Dos metros cúbicos de aire, inicialmente a la presión atmosférica, se comprimen hasta ocupar  $0,500\text{ m}^3$ . Para una compresión isotérmica, ¿cuál es la presión final?  
*Sol.*  $4,132\text{ kg/cm}^2$  (ab)
41. En el problema precedente, ¿cuál será la presión final si no hay pérdidas de calor durante la compresión?  
*Sol.*  $7,20\text{ kg/cm}^2$  (ab)
42. Determinar la viscosidad absoluta del mercurio en  $\text{kg seg/m}^2$  si en poises es igual a  $0,0158$ .  
*Sol.*  $1,61 \times 10^{-4}\text{ kg seg/m}^2$
43. Si la viscosidad absoluta de un aceite es de  $510$  poises, ¿cuál es la viscosidad en el sistema  $\text{kg-m-seg}$ ?  
*Sol.*  $5,210\text{ kg seg/m}^2$
44. ¿Qué valores tienen las viscosidades absoluta y cinemática en el sistema técnico de unidades ( $\text{kg-m-seg}$ ) de un aceite que tiene una viscosidad Saybolt de  $155\text{ seg}$  y una densidad relativa de  $0,932$ ?  
*Sol.*  $315 \times 10^{-5}$  y  $33,3 \times 10^{-6}$
45. Dos superficies planas de grandes dimensiones están separadas  $25\text{ mm}$  y el espacio entre ellas está lleno con un líquido cuya viscosidad absoluta es  $0,10\text{ kg seg/m}^2$ . Suponiendo que el gradiente de velocidades es lineal, ¿qué fuerza se requiere para arrastrar una placa de muy poco espesor y  $40\text{ dm}^2$  de área a la velocidad constante de  $32\text{ cm/seg}$  si la placa dista  $8\text{ mm}$  de una de las superficies?  
*Sol.*  $2,35\text{ kg}$
46. El depósito de la Fig. 1-18 contiene un aceite de densidad relativa  $0,750$ . Determinar la lectura del manómetro A en  $\text{kg/cm}^2$ .  
*Sol.*  $-8,71 \times 10^{-2}\text{ kg/cm}^2$  (man)
47. Un depósito cerrado contiene  $60\text{ cm}$  de mercurio,  $150\text{ cm}$  de agua y  $240\text{ cm}$  de un aceite de densidad relativa  $0,750$ , conteniendo aire el espacio sobre el aceite. Si la presión manométrica en el fondo del depósito es de  $3,00\text{ kg/cm}^2$ , ¿cuál será la lectura manométrica en la parte superior del depósito?  
*Sol.*  $1,860\text{ kg/cm}^2$  (man)
48. Con referencia a la Fig. 1-19, el punto A está  $53\text{ cm}$  por debajo de la superficie libre del líquido, de densidad relativa  $1,25$ , en el recipiente. ¿Cuál es la presión manométrica en A si el mercurio asciende  $34,30\text{ cm}$  en el tubo?  
*Sol.*  $-0,40\text{ kg/cm}^2$  (man)

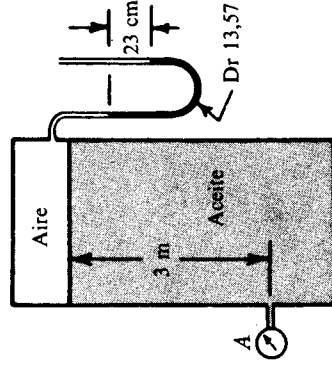


Fig. 1-18

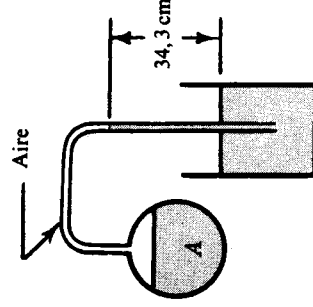


Fig. 1-19

49. Con referencia a la Fig. 1-20 y despreciando el rozamiento entre el pistón  $A$  y el cilindro que contiene el gas, determinar la presión manométrica en  $B$  en cm de agua. Supóngase que el gas y el aire tienen pesos específicos constantes e iguales, respectivamente, a 0,560 y 1,200 kg/m<sup>3</sup>. *Sol.* 60,60 cm de agua.

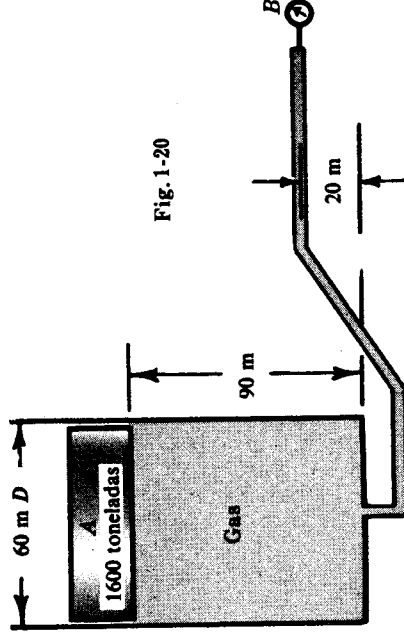


Fig. 1-20

50. Los recipientes  $A$  y  $B$ , que contienen aceite y glicerina de densidades relativas 0,780 y 1,250, respectivamente, están conectados mediante un manómetro diferencial. El mercurio del manómetro está a una elevación de 50 cm en el lado de  $A$  y a una elevación de 35 cm en el lado de  $B$ . Si la cota de la superficie libre de la glicerina en el depósito  $B$  es de 6,40 m, ¿a qué cota está la superficie libre del aceite en el recipiente  $A$ ?  
*Sol.* Cota 7,60 m

51. Un depósito  $A$ , a una elevación de 2,50 m, contiene agua a una presión de 1,05 kg/cm<sup>2</sup>. Otro depósito  $B$ , a una elevación de 3,70 m, contiene un líquido a una presión de 0,70 kg/cm<sup>2</sup>. Si la lectura de un manómetro diferencial es de 30 cm de mercurio, estando la parte más baja en el lado de  $A$  y a una cota de 30 cm, determinar la densidad relativa del líquido contenido en  $B$ . *Sol.* 0,525

52. El aire del recipiente de la izquierda de la Fig. 1-21 está a una presión de -23 cm de mercurio. Determinar la cota del líquido manométrico en la parte derecha, en  $A$ .  
*Sol.* Elevación 26,30 m

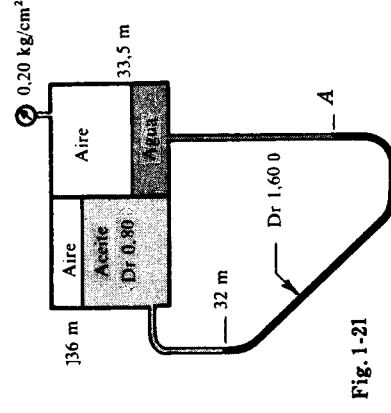


Fig. 1-21

53. Los compartimientos  $B$  y  $C$  de la Fig. 1-22 están cerrados y llenos de aire. La lectura barométrica es 1,020 kg/cm<sup>2</sup>. Cuando los manómetros  $A$  y  $D$  marcan las lecturas indicadas, ¿qué valor tendrá  $x$  en el manómetro  $E$  de mercurio?  
*Sol.* 1,80 m

54. El cilindro y el tubo mostrados en la Fig. 1-23 contienen aceite de densidad relativa 0,902. Para una lectura manométrica de 2,20 kg/cm<sup>2</sup>, ¿cuál es el peso total del pistón y la placa  $W$ ?  
*Sol.* 60.100 kg

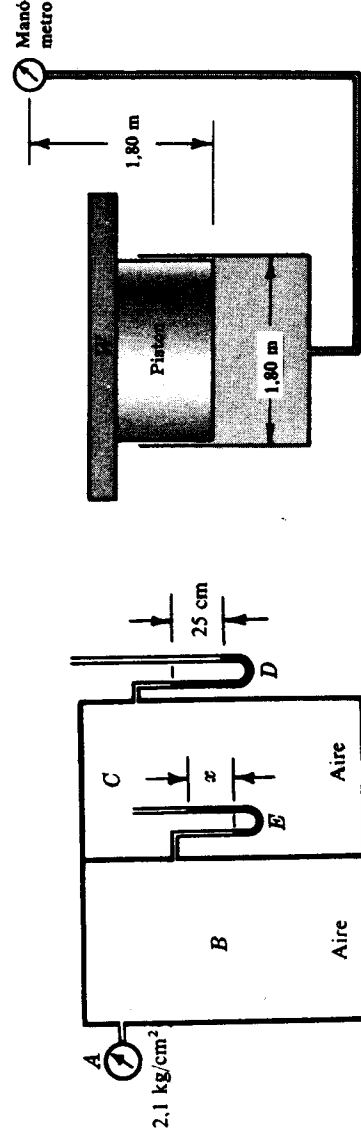


Fig. 1-22

Fig. 1-23

55. Con referencia a la Fig. 1-24, ¿qué presión manométrica de  $A$  hará que la glicerina suba hasta el nivel  $B$ ? Los pesos específicos del aceite y glicerina son  $832$  y  $1250 \text{ kg/m}^3$ , respectivamente.

*Sol.*  $0,35 \text{ kg/cm}^2$

56. Para levantar una plataforma de  $10$  toneladas se utiliza un gato hidráulico. Si en el pistón actúa una presión de  $12 \text{ kg/cm}^2$  y es transmitida por un aceite de densidad relativa  $0,810$ , ¿qué diámetro se requiere? *Sol.*  $32,60 \text{ cm}$

57. Si el peso específico de la glicerina es  $1260 \text{ kg/m}^3$ , ¿qué presión de succión se requerirá para elevar la glicerina  $22 \text{ cm}$  en un tubo de  $12,50 \text{ mm}$  de diámetro?

*Sol.*  $-277 \text{ kg/m}^2$

58. ¿Cuál es el valor de la presión interior en una gota de lluvia de  $1,50 \text{ mm}$  de diámetro si la temperatura es de  $21^\circ \text{ C}$ ?

*Sol.*  $19,70 \text{ kg/m}^2 \text{ (man)}$

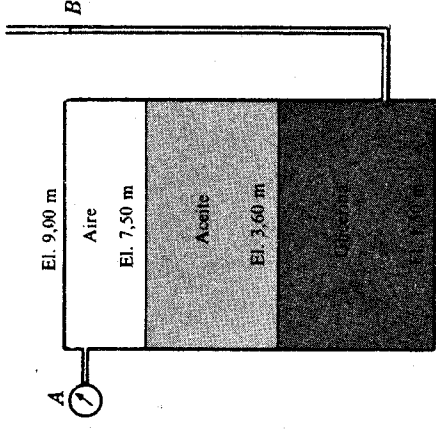


Fig. 1-24



## Fuerzas hidrostáticas sobre las superficies

### INTRODUCCION

El ingeniero debe calcular las fuerzas ejercidas por los fluidos con el fin de poder diseñar satisfactoriamente las estructuras que los contienen. En este capítulo se evaluarán las tres características de fuerzas hidrostáticas, a saber: módulo, dirección y sentido. Además se determinará también la localización de la fuerza.

### FUERZA EJERCIDA POR UN LIQUIDO SOBRE UN AREA PLANA

La fuerza  $P$  ejercida por un líquido sobre un área plana  $A$  es igual al producto del peso específico del líquido por la profundidad  $h_{cg}$  del centro de gravedad de la superficie y por el área de la misma. ecuación es

$$P = w h_{cg} A$$

siendo las unidades

$$\text{kg} = \text{kg/m}^3 \times \text{m} \times \text{m}^2$$

Se observa que el producto del peso específico  $w$  por la profundidad del centro de gravedad de la superficie es igual a la presión en el centro de gravedad del área.

La línea de acción de la fuerza pasa por el centro de presión, que se localiza mediante la fórmula

$$y_{cp} = \frac{I_{cg}}{y_{cg} A} + y_{cg}$$

donde  $I_{cg}$  es el momento de inercia del área respecto de un eje que pasa por su centro de gravedad. Las distancias  $y$  se miden a lo largo del plano y a partir de un eje determinado por la intersección del plano que contiene la superficie y de la superficie libre del líquido.

La componente horizontal de la fuerza hidrostática sobre una superficie cualquiera (plana o irregular) es igual a la fuerza normal sobre la proyección vertical de la superficie. La componente pasa por el centro de presión de la proyección vertical.

La componente vertical de la fuerza hidrostática sobre cualquier superficie (plana o irregular) igual al peso del líquido situado sobre el área, real o imaginario. La fuerza pasa por el centro de gravedad del volumen.

### TENSION CIRCUNFERENCIAL O TANGENCIAL

La tensión circunferencial o tangencial ( $\text{kg/cm}^2$ ) se origina en las paredes de un cilindro sometido a presión interna. Para cilindros de pared delgada ( $t \leq 0,1d$ ),

$$\text{Tensión } \sigma \text{ (kg/cm}^2\text{)} = \frac{\text{presión } p' \text{ (kg/cm}^2\text{)} \times \text{radio } r \text{ (cm)}}{\text{espesor } t \text{ (cm)}}$$

# ENSION LONGITUDINAL EN CILINDROS DE PARED DELGADA

La tensión longitudinal ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) en un cilindro de pared delgada cerrado por los extremos es igual la mitad de la tensión circunferencial.

## Problemas resueltos

Desarrollar (a) la ecuación que da la fuerza hidrostática que actúa sobre un área plana y (b) localizar la fuerza.

### Solución:

(a) La traza  $AB$  representa un área plana cualquiera sobre la que actúa un fluido y que forma el ángulo  $\theta$  con la horizontal, como se muestra en la Fig. 2-1. Se considera un área elemental de forma que todas sus partículas están situadas a la misma distancia  $h$  por debajo de la superficie libre del líquido. En la figura viene representada por la banda con rayado inclinado, y la presión sobre esta área es *uniforme*. Por tanto, la fuerza que actúa sobre esta área  $dA$  es igual al producto de la presión  $p$  por el área  $dA$  o bien

$$dP = p \, dA = w h \, dA$$

Sumando todas las fuerzas elementales y considerando que  $h = y \, \text{sen } \theta$ ,

$$\begin{aligned} P &= \int w h \, dA = \int w (y \, \text{sen } \theta) \, dA \\ &= (w \, \text{sen } \theta) \int y \, dA = (w \, \text{sen } \theta) y_{cg} A \end{aligned}$$

donde  $w$  y  $\theta$  son constantes y, por estática,  $\int y \, dA = y_{cg} A$ . Como  $h_{cg} = y_{cg} \, \text{sen } \theta$ ,

$$P = w \, h_{cg} A \tag{1}$$

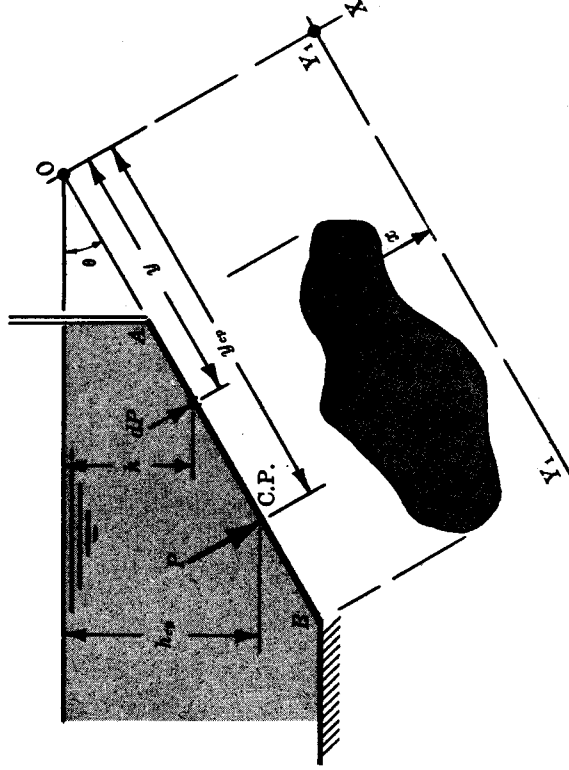


Fig. 2-1

- (b) Para situar la fuerza  $P$  se procede a tomar momentos como en estática. El eje  $OX$  se escoge como la intersección del plano que contiene la superficie con la superficie libre del agua. Todas las distancias  $y$  se miden partir de este eje, y la distancia a la fuerza resultante se representa por  $y_{cp}$ , que mide la distancia al centro de presión. Como la suma de los momentos de todas las fuerzas respecto del eje  $OX =$  al momento de la fuerza resultante, se obtiene

$$\int (dP \times y) = P \times y_{cp}$$

Pero  $dP = wh \, dA = w(y \, \text{sen } \theta) dA$  y  $P = (w \, \text{sen } \theta) y_{cg} A$ . De aquí,

$$(w \, \text{sen } \theta) \int y^2 dA = (w \, \text{sen } \theta) (y_{cg} A) y_{cp}$$

Como  $\int y^2 dA$  es el momento de inercia del área plana respecto del eje  $OX$ ,

$$\frac{I_o}{y_{cg} A} = y_{cp}$$

En forma más conveniente, a partir del teorema de Steiner,

$$y_{cp} = \frac{I_{cg} + A y_{cg}^2}{y_{cg} A} = \frac{I_{cg}}{y_{cg} A} + y_{cg} \quad ($$

Se observa que la posición del centro de presión está siempre *por debajo* del centro de gravedad de superficie o bien ( $y_{cp} - y_{cg}$ ) es siempre positivo ya que  $I_{cg}$  es esencialmente positivo.

## 2. Situar lateralmente la posición del centro de presión. Referirse a la Figura 2-1.

### Solución:

Si bien, en general, no se requiere conocer la posición lateral del centro de presión, en algunas ocasiones es necesaria dicha información. Utilizando el dibujo del problema precedente, el área elemental  $dA$  está ahora formada por  $(dx \, dy)$  de forma que para los momentos puede tomarse la distancia  $x$  convenientemente. Tomando momentos respecto de un eje  $Y_1 Y_1$ ,

$$P x_{cp} = \int (dP x)$$

Al utilizar los valores obtenidos en el Problema 1 anterior,

$$(wh_{cg} A) x_{cp} = \int p(dx \, dy) x = \int wh(dx \, dy) x$$

$$0 \quad (w \, \text{sen } \theta) (y_{cg} A) x_{cp} = (w \, \text{sen } \theta) \int x y (dx \, dy)$$

ya que  $h = y \, \text{sen } \theta$ . La integral representa el producto de inercia del área plana respecto de los ejes  $X$  e  $Y$  seleccionados, representado por  $I_{xy}$ . Por tanto,

$$x_{cp} = \frac{I_{xy}}{y_{cg} A} = \frac{(I_{xy})_{cg}}{y_{cg} A} + x_{cg}$$

Si *uno u otro* de los ejes centroidales fuera un eje de simetría del área plana,  $I_{xy}$  sería nulo y la posición lateral del centro de presión estaría sobre el eje  $Y$  que pasa a través del centro de gravedad (no se muestra en la figura). Obsérvese que el producto de inercia respecto de un sistema de ejes que pasan por el centro de gravedad,  $(I_{xy})_c$ , puede ser positivo o negativo, de forma que la posición lateral del centro de presión puede caer a *uno u otro* lado del eje centroidal  $y$ .

3. Determinar la fuerza resultante  $P$  debida a la acción del agua sobre la superficie plana rectangular  $AB$  de medidas  $1 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  que se muestra en la Figura 2-2.

**Solución:**

$$P = wh_{cg}A = (1000 \text{ kg/m}^3) \times (1,20 + 1,00) \text{ m} \times (1 \times 2) \text{ m}^2 = 4400 \text{ kg}$$

Esta fuerza actúa sobre el centro de presión, que está a una distancia  $y_{cp}$  del eje  $O_1$  y es igual a

$$y_{cp} = \frac{I_{cg}}{y_{cg}A} + y_{cg} = \frac{1(2^3)/12}{2,20(1 \times 2)} + 2,20 = 2,352 \text{ m de } O_1$$

4. Determinar la fuerza resultante debida a la acción del agua sobre el área rectangular  $CD$  de  $1,20 \text{ m} \times 1,80 \text{ m}$  mostrada en la Fig. 2-2.  $C$  es un vértice del triángulo.

**Solución:**

$$P_{CD} = 1000(1 + \frac{2}{3} \times 0,707 \times 1,8)(\frac{1}{2} \times 1,2 \times 1,8) = 1200 \text{ kg}$$

Esta fuerza actúa a una distancia  $y_{cp}$  del eje  $O_2$ , estando medida esta distancia sobre el plano al que pertenece el área  $CD$ .

$$y_{cp} = \frac{1,2(1,8^3)/36}{(1,85/0,707)(\frac{1}{2} \times 1,2 \times 1,8)} + \frac{1,85}{0,707} = 0,07 + 2,61 = 2,68 \text{ m del eje } O_2$$

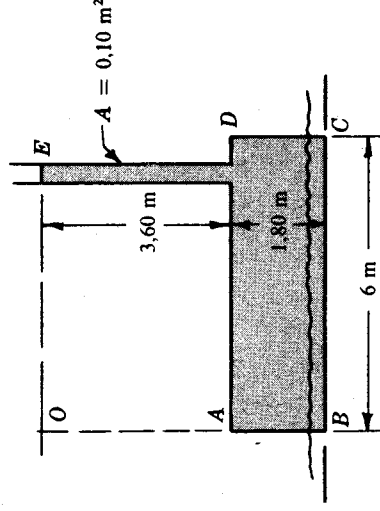
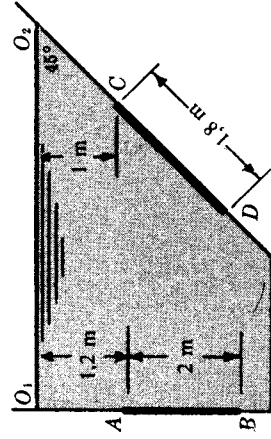


Fig. 2-2

Fig. 2-3

5. El agua alcanza el nivel  $E$  en la tubería unida al depósito  $ABCD$  que se muestra en la Fig. 2-3. Despreciando el peso del depósito y de la tubería de elevación, (a) determinar y situar la fuerza resultante que actúa sobre el área  $AB$  de  $2,40 \text{ m}$  de anchura, (b) la fuerza total sobre el fondo del depósito y (c) comparar el peso total del agua con la resultante obtenida en (b) y explicar la diferencia.

**Solución:**

- (a) La profundidad del centro de gravedad del área  $AB$ , respecto de la superficie libre del agua en  $E$ , es de  $4,50 \text{ m}$ . Por tanto,

$$P = whA = 1000(3,60 + 0,90)(1,80 \times 2,40) = 19.440 \text{ kg, que actúa a la distancia.}$$

$$y_{cp} = \frac{2,4(1,8^3)/12}{4,5(1,8 \times 2,4)} + 4,5 = 4,56 \text{ m de } O$$

- (b) La presión en el fondo  $BC$  es uniforme; por consiguiente, la fuerza

$$P = pA = (wh)A = 1000(5,40)(6 \times 2,40) = 77.760 \text{ kg}$$

- (c) El peso total del agua es  $W = 1000(6 \times 1,8 \times 2,4 + 3,6 \times 0,10) = 26.280 \text{ kg}$ .

El cuerpo libre constituido por la parte inferior del depósito (cortado por un plano horizontal justamente encima del nivel  $BC$ ) pondrá de manifiesto una fuerza, dirigida hacia abajo, sobre el área  $BC$  de 77.760 kg, fuerza vertical de tracción sobre las paredes del depósito y fuerza de reacción sobre el plano soporte. La reacción ha de ser igual al peso total del agua, es decir, 26.280 kg. La tracción en las paredes del depósito es producida por la fuerza vertical, dirigida hacia arriba, que actúa sobre la parte superior  $AD$  del depósito, que es igual

$$P_{AD} = (wh)A = 1000(3,6)(14,4 - 0,1) = 51.480 \text{ kg hacia arriba}$$

Se ha aclarado así una aparente paradoja, pues para el cuerpo libre considerado, la suma de las fuerzas verticales es igual a cero, es decir,

$$77.760 - 26.280 - 51.480 = 0$$

con lo que se satisface la condición de equilibrio.

6. La compuerta  $AB$  de la Fig. 2-4(a) tiene 1,20 m de anchura y está articulada en  $A$ . La lectura manométrica en  $G$  es  $-0,15 \text{ kg/cm}^2$  y el aceite que ocupa el depósito de la derecha tiene una densidad relativa de 0,750. ¿Qué fuerza horizontal debe aplicarse en  $B$  para que la compuerta  $AB$  se mantenga en equilibrio?

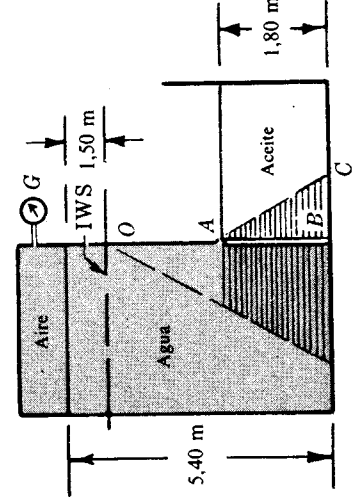


Fig. 2-4(a)

### Solución:

Deben calcularse el valor de las fuerzas debidas a la acción de los líquidos y su posición. Para el lado derecho,

$$P_{ac} = wh_{eq}A = (0,750 \times 1000)(0,9)(1,8 \times 1,2) = 1460 \text{ kg hacia la izquierda}$$

$$\text{y actúa en } y_{cp} = \frac{1,2(1,8^3)/12}{0,9(1,2 \times 1,8)} + 0,9 = 1,20 \text{ m de } A$$

Se observa que la presión que actúa sobre la parte derecha de la compuerta  $AB$  rectangular varía linealmente desde una presión manométrica nula hasta el valor que corresponde a los 1,80 m de aceite ( $p = wh$  es una ecuación lineal). El diagrama de cargas  $ABC$  pone de manifiesto este hecho. Solo para el caso de áreas rectangulares, el centro de gravedad de este diagrama de cargas coincide con el centro de presión. El centro de gravedad está localizado a  $(2/3)(1,8) = 1,2 \text{ m}$  de  $A$ , como ya se ha obtenido.

Para el lado izquierdo, es necesario convertir la presión negativa, debida al aire, en su equivalente en metros de agua.

$$h = -\frac{p}{w} = -\frac{0,15 \times 10^4 \text{ kg/m}^2}{1000 \text{ kg/m}^3} = -1,50 \text{ m}$$

Esta altura de presión negativa es equivalente a un descenso del nivel del agua de 1,50 m. Es útil y conveniente el empleo de una superficie de agua imaginaria (IWS: Imaginary Water Surface) 1,50 m por debajo de la superficie real y resolver el problema por aplicación directa de las ecuaciones fundamentales. Así,

$$P_{ag} = 1000(2,1 + 0,9)(1,8 \times 1,2) = 6480 \text{ kg, que actúa hacia la derecha sobre el centro de presión}$$

Para el área rectangular sumergida,  $y_{cp} = \frac{1,2(1,8^3)/12}{3(1,8 \times 1,2)} + 3 = 3,09 \text{ m de } O$  o bien el centro de presión está a  $(3,09 - 2,10) = 0,99 \text{ m de } A$ .

En la Fig. 2-4(b) se muestra el diagrama del cuerpo libre de la compuerta  $AB$  con las fuerzas actuantes. La suma de momentos respecto de  $A$  debe ser igual a cero. Tomando como positivo el giro de las agujas del reloj,

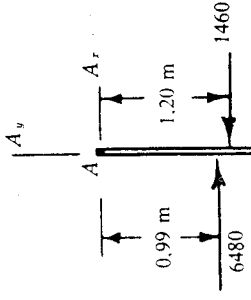
$$+1460 \times 1,2 + 1,8F - 6480 \times 0,99 = 0 \quad \text{y} \quad F = 2590 \text{ kg hacia la izquierda}$$


Fig. 2-4(b)

El depósito de la Fig. 2-5 contiene aceite y agua. Encontrar la fuerza resultante sobre la pared  $ABC$  que tiene 1,20 m de anchura.

**Solución:**

La fuerza total sobre  $ABC$  es igual a  $(P_{AB} + P_{BC})$ . Hay que encontrar cada una de las fuerzas, situar su posición y, aplicando el principio de los momentos, hallar la posición de la fuerza total resultante sobre la pared  $ABC$ .

- (a)  $P_{AB} = (0,800 \times 1000)(1,5)(3 \times 1,2) = 4320$  kg, que actúa en el punto  $(2/3)(3)$  m de  $A$ , o sea, 2 m por debajo. Puede obtenerse este mismo aplicando la fórmula conocida, como sigue:

$$y_{cp} = \frac{1,2(3^3)/12}{1,5(1,2 \times 3)} + 1,5 = 0,5 + 1,5 = 2,00 \text{ m de } A$$

- (b) El agua actúa sobre la cara  $BC$  y la acción del líquido superior puede tenerse en cuenta por la altura o profundidad de agua equivalente. Se emplea en este segundo cálculo la superficie de agua imaginaria (IWS), situando la IWS por cambio de los 3 m de aceite en los  $0,800 \times 3 = 2,40$  m de agua. Por tanto,

$$P_{BC} = 1000(2,4 + 0,9)(1,8 \times 1,2) = 7128 \text{ kg, que actúa en el centro de presión}$$

$$y_{cp} = \frac{1,2(1,8^3)/12}{3,3(1,2 \times 1,8)} + 3,3 = 3,38 \text{ m de } O \quad \text{o bien} \quad 0,6 + 3,38 = 3,98 \text{ m de } A$$

La fuerza resultante total  $\hat{=}$   $4320 + 7128 = 11.448$  kg, que actúa en el centro de presión que corresponde al área total. El momento de esta resultante  $=$  la suma de los momentos de las dos fuerzas parciales anteriores. Tomando momentos respecto de  $A$ ,

$$11.448 Y_{cp} = 4320 \times 2 + 7128 \times 3,98 \quad \text{e} \quad Y_{cp} = 3,23 \text{ m de } A$$

Pueden emplearse para estos cálculos otros métodos, pero el presentado aquí reduce los errores tanto en el planteamiento como en los cálculos.

En la Fig. 2-6 la compuerta  $ABC$  está articulada en  $B$  y tiene 1,2 m de longitud. Despreciando el peso de la compuerta, determinar el momento no equilibrado debido a la acción del agua sobre la compuerta.

**Solución:**

$$P_{AB} = 1000(1,25)(2,88 \times 1,2) = 4325 \text{ kg, que actúa a } \frac{2}{3}(2,88) = 1,92 \text{ m de } A.$$

$P_{BC} = 1000(2,5)(1 \times 1,2) = 3000$  kg, que actúa sobre el centro de gravedad de  $BC$ , ya que la presión es uniforme sobre  $BC$ . Tomando de momentos respecto de  $B$  (positivo el sentido de giro de las agujas de un reloj),

$$\begin{aligned} \text{Momento no equilibrado} &= +4325 \times 0,96 - 3000 \times 0,50 \\ &= +2650 \text{ m kg (sentido de las agujas del reloj)} \end{aligned}$$

Determinar la fuerza resultante debida a la acción del agua sobre la superficie vertical mostrada en la Fig. 2-7(a) y situar el centro de presión en las direcciones  $x$  e  $y$ .

**Solución:**

Se considera la superficie dividida en un triángulo y un rectángulo. La fuerza total que actúa es igual a la suma de la fuerza  $P_1$  que actúa sobre el rectángulo más la  $P_2$  que actúa sobre el triángulo.

- (a)  $P_1 = 1000(1,2)(2,4 \times 1,2) = 3456$  kg, que actúa a  $\frac{2}{3}(2,4) = 1,60$  m por debajo de la superficie  $XX$ .

$$P_2 = 1000(3)(\frac{1}{2} \times 1,8 \times 1,2) = 3240 \text{ kg, que actúa a } y_{cp} = \frac{1,2(1,8^3)/36}{3(\frac{1}{2} \times 1,2 \times 1,8)} + 3 = 3,06 \text{ m por debajo de } XX.$$

La fuerza resultante  $P = 3456 + 3240 = 6696$  kg. Tomando momentos respecto de  $XX$ ,

$$6696 Y_{cp} = 3456(1,6) + 3240(3,06) \quad \text{e} \quad Y_{cp} = 2,31 \text{ m por debajo de } XX$$

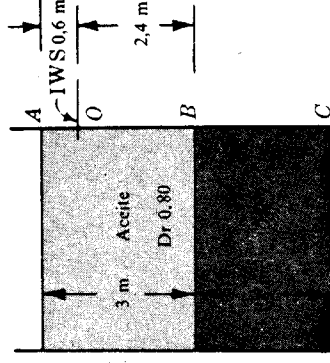


Fig. 2-5

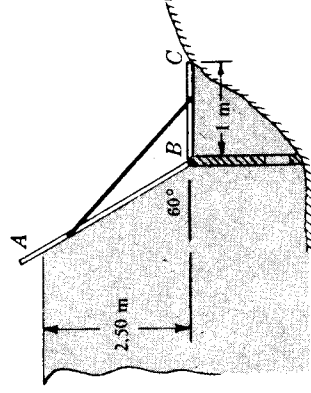


Fig. 2-6

- (b) Para localizar el centro de presión en la dirección  $X$  (cosa necesaria raras veces) se utiliza el principio de los momentos, después de conocer  $x_1$  y  $x_2$  para el rectángulo y el triángulo, respectivamente. Para el rectángulo, el centro de presión de cada banda elemental horizontal de área  $dA$  está a  $0,6$  m del eje  $YY$ ; por tanto, el centro de presión del área total del rectángulo está también a  $0,6$  m de dicho eje. Para el triángulo, cada área elemental  $dA$  tiene su propio centro de presión en el centro de la banda; por consiguiente, la mediana contiene a todos estos centros de presión, y el centro de presión del triángulo completo puede calcularse ahora. Con referencia a la Fig. 2-7(b), por triángulos semejantes,  $x_2/0,6 = 1,14/1,8$ , de la cual  $x_2 = 0,38$  m de  $YY$ . Tomando momentos,

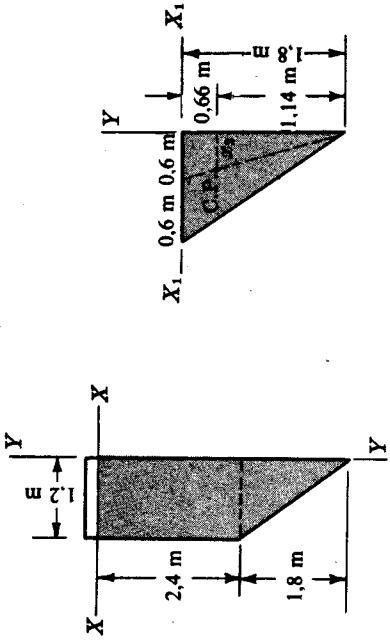


Fig. 2-7(a)

Fig. 2-7(b)

$$6696 X_{cp} = 3456(0,6) + 3240(0,38) \quad \text{y} \quad X_{cp} = 0,494 \text{ m del eje } YY$$

Puede utilizarse otro método para situar el centro de presión. En lugar de dividir el área en dos partes, se calcula la posición del centro de gravedad del área *total*. Mediante el teorema de Steiner, se determina el momento de inercia y el producto de inercia del área total respecto de los ejes paralelos por el centro de gravedad. Entonces se calculan los valores de  $y_{cp}$  y  $x_{cp}$  mediante las fórmulas (2) y (4), Problemas 1 y 2. Generalmente, este otro método no tiene ninguna ventaja en particular y entraña más operaciones.

10. La compuerta  $AB$  de  $1,80$  m de diámetro de la Fig. 2-8 puede girar alrededor del eje horizontal  $C$ , situado  $10$  cm por debajo del centro de gravedad. ¿Hasta qué altura  $h$  puede ascender el agua sin que se produzca un momento no equilibrado respecto de  $C$ , del sentido de las agujas de un reloj?

#### Solución:

Cuando el centro de presión coincide con el eje  $C$  no actuará sobre la compuerta ningún momento no equilibrado. Calculando la distancia del centro de presión,

$$y_{cp} = \frac{I_{cg}}{y_{cg}A} + y_{cg} = \frac{\pi d^4/64}{y_{cg}(\pi d^2/4)} + y_{cg}$$

$$\text{De aquí, } y_{cp} - y_{cg} = \frac{\pi 1,8^4/64}{(h + 0,9)(\pi 1,8^2/4)} = 0,10 \text{ m (dado)}$$

de donde  $h = 1,125$  m por encima de  $A$ .

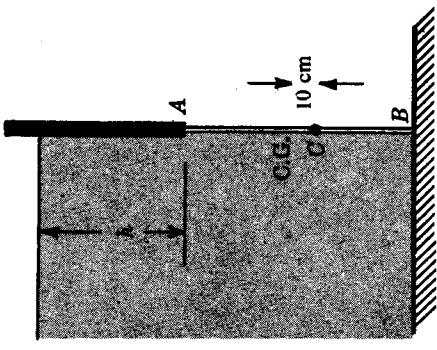


Fig. 2-8

11. Con referencia a la Fig. 2-9, ¿cuál es la anchura mínima  $b$  de la base de la presa de gravedad de una altura de  $30$  m al suponer que la presión hidrostática ascensional en la base de la presa varía uniformemente desde la altura de presión total en el borde de aguas arriba hasta el valor cero en el borde de aguas abajo, y suponiendo además un empuje  $P$ , debido a una capa de hielo de  $18.600$  kg por metro lineal de presa y que actúa en la parte superior? Para este estudio se supone que las fuerzas resultantes de la reacción cortan a la base a un tercio de la base del borde de aguas abajo (en  $O$ ) y que el peso específico del material de la presa es  $2,50w$  ( $w$  es el peso específico del agua).

#### Solución:

En la figura aparecen las componentes  $H$  y  $V$  de la reacción de la cimentación sobre la presa, que pasan a través de  $O$ . Se considera una longitud de un metro de presa y se calculan todas las fuerzas en función de  $w$  y  $b$ , como sigue:

$$P_H = w(15)(30 \times 1) = 450w \text{ kg}$$

$$P_V = \text{área del diagrama de carga} \\ = \frac{1}{2}(30w)(b \times 1) = 15wb \text{ kg}$$

$$W_1 = 2,50w(6 \times 30 \times 1) = 450w \text{ kg}$$

$$W_2 = 2,50w\left[\frac{1}{2} \times 30(b - 6)\right] \times 1 \\ = 37,5w(b - 6) \text{ kg} = (37,5wb - 225w) \text{ kg}$$

$$P_I = 18.600 \text{ kg, supuestos para el empuje del hielo}$$

Para determinar el valor de  $b$ , en el equilibrio, se toman momentos respecto del eje  $O$  de estas fuerzas. Considerando como positivos los momentos que producen giros en el sentido de las agujas de un reloj,

$$450w\left(\frac{30}{3}\right) + 15wb\left(\frac{b}{3}\right) - 450w\left(\frac{b}{3}\right) - 225w\left[\frac{2}{3}(b - 6) - \frac{b}{3}\right] + 18.600(30) = 0$$

Simplificando y haciendo operaciones,  $b^2 + 10b - 734,4 = 0$  y  $b = 22,5 \text{ m}$  de anchura.

Determinar y situar las componentes de la fuerza debida a la acción del agua sobre la compuerta de sector  $AB$  de la Fig. 2-10 por metro de longitud de compuerta.

**Solución:**

$$P_H = \text{fuerza sobre la proyección vertical de } CB = w h_{cg} A_{CB} \\ = 1000(1)(2 \times 1) = 2000 \text{ kg, que actúa a } (2/3)(2) = 1,33 \text{ m de } C \\ P_V = \text{peso del agua sobre el área } AB = 1000(\pi^2/4 \times 1) = 3140 \text{ kg}$$

que pasa por el centro de gravedad del volumen de líquido. El centro de gravedad del cuadrante de un círculo está situado a una distancia de  $4/3 \times r/\pi$  de cada uno de los radios perpendiculares que lo limitan. Por tanto,

$$x_{c,p} = 4/3 \times 2/\pi = 0,85 \text{ m a la izquierda del radio } BC$$

**Nota:** Cada una de las fuerzas elementales  $dP$  actúa normal a la curva  $AB$  y, por tanto, su línea de acción pasa por el eje  $C$ . La fuerza resultante también pasará por  $C$ . Para confirmar esta proposición, se toman momentos respecto de  $C$ , como sigue,

$$\Sigma M_C = -2000 \times 1,33 + 3140 \times 0,85 = 0 \quad (\text{luego se satisface})$$

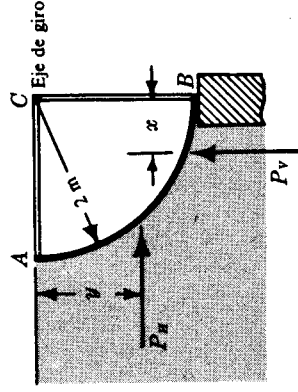


Fig. 2-10

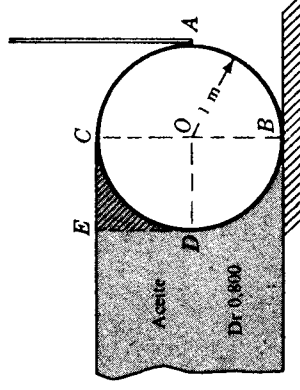


Fig. 2-11

El cilindro de la Fig. 2-11, de 2 m de diámetro, pesa 2500 kg y tiene una longitud de 1,50 m. Determinar las reacciones en  $A$  y  $B$  despreciando el rozamiento.

**Solución:**

(a) La reacción en  $A$  es debida a la componente horizontal de la fuerza que el líquido ejerce sobre el cilindro o bien

$$P_H = (0,800 \times 1000)(1)(2 \times 1,5) = 2400 \text{ kg}$$

dirigida hacia la derecha. Por tanto, la reacción en  $A$  es igual a 2400 kg dirigida hacia la izquierda.

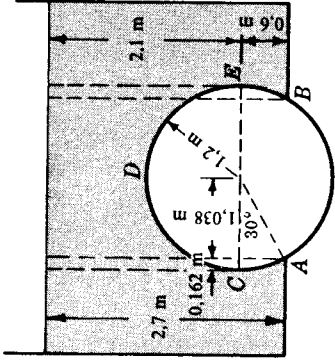




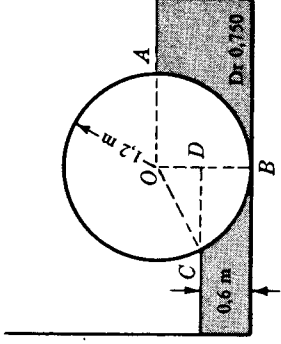
5. En la Fig. 2-13, un cilindro de 2,4 m de diámetro cierra un agujero rectangular en un depósito de 0,9 m. ¿Con qué fuerza queda presionado el cilindro contra el fondo del depósito por la acción de los 2,7 m de profundidad de agua?

**Solución:**

$$\begin{aligned}
 (\text{Neta}) P_V &= \text{fuerza hacia abajo sobre } CDE - \text{fuerza hacia arriba sobre } CA \text{ y } BE \\
 &= 1000 \times 0,9 \left[ (2,1 \times 2,4 - \frac{1}{2} \pi 1,2^2) - 2(2,1 \times 0,162 + \frac{1}{12} \pi 1,2^2 - \frac{1}{2} \times 0,6 \times 0,6 \times 1,038) \right] \\
 &= 2500 - 810 = 1690 \text{ kg hacia abajo}
 \end{aligned}$$



**Fig. 2-13**



**Fig. 2-14**

En la Fig. 2-14, el cilindro de 2,4 m de diámetro pesa 250 kg y reposa sobre el fondo de un depósito de 1 m de longitud. Se vierten agua y aceite en la parte izquierda y derecha del depósito hasta unas profundidades de 0,6 y 1,2 m, respectivamente. Hallar los módulos de las componentes horizontal y vertical de la fuerza que mantiene al cilindro justamente en contacto con el depósito en B.

**Solución:**

$$\begin{aligned}
 (\text{Neta}) P_H &= \text{componente sobre } AB \text{ hacia la izquierda} - \text{componente sobre } CB \text{ hacia la derecha} \\
 &= 0,750 \times 1000 \times 0,6(1,2 \times 1) - 1000 \times 0,3(0,6 \times 1) = 360 \text{ kg hacia la izquierda}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (\text{Neta}) P_V &= \text{componente hacia arriba sobre } AB + \text{componente hacia arriba sobre } CB \\
 &= \text{peso del cuadrante de aceite} + \text{peso de (sector - triángulo) de agua} \\
 &= 0,750 \times 1000 \times 1 \times \frac{1}{4} \pi 1,2^2 + 1000 \times 1 \left( \frac{1}{6} \pi 1,2^2 - \frac{1}{2} \times 0,6 \sqrt{1,08} \right) = 1290 \text{ kg hacia arriba}
 \end{aligned}$$

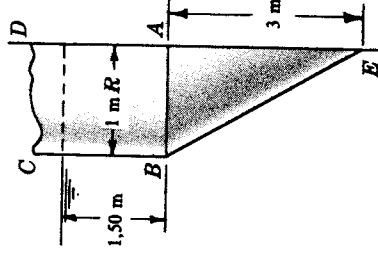
Las componentes para mantener el cilindro en su sitio serán 360 kg hacia la derecha y 1040 kg hacia abajo

El estribo semicónico  $ABE$ , que se muestra en la Fig. 2-15, se utiliza para soportar la torre semicilíndrica  $ABCD$ . Calcular las componentes horizontal y vertical debidas a la fuerza que produce la acción del agua sobre el estribo  $ABE$ .

**Solución:**

$$\begin{aligned}
 P_H &= \text{fuerza sobre la proyección vertical del semicono} \\
 &= 1000(1,5 + 1) \left( \frac{1}{2} \times 3 \times 2 \right) \\
 &= 7500 \text{ kg hacia la derecha}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_V &= \text{peso del volumen de agua sobre la superficie curvada (imaginaria)} \\
 &= 1000(\text{volumen del semicono} + \text{volumen del semicilindro}) \\
 &= 1000 \left( \frac{1}{2} \times 3 \pi 1^2 / 3 + \frac{1}{2} \pi 1^2 \times 1,5 \right) \\
 &= 3925 \text{ kg hacia arriba}
 \end{aligned}$$



**Fig. 2-15**

18. Una tubería de acero de 120 cm de diámetro y 6 mm de espesor transporta aceite de densidad relativa 0,822 bajo una carga de 120 m de aceite. Calcular (a) la tensión en el acero y (b) el espesor del acero que se necesita para transportar el aceite bajo una presión de 18 kg/cm<sup>2</sup> si la tensión de trabajo admisible en el acero es de 13 kg/mm<sup>2</sup>.

**Solución:**

$$\begin{aligned} (a) \quad \sigma \text{ (tensión en kg/cm}^2\text{)} &= \frac{p' \text{ (presión en kg/cm}^2\text{)} \times r \text{ (radio en cm)}}{t \text{ (espesor en cm)}} \\ &= \frac{(0,822 \times 1000 \times 120)/10^4 \times 60}{0,6} = 986 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

$$(b) \quad \sigma = p' r / t, \quad 1300 = 18 \times 60 / t, \quad t = 0,83 \text{ cm.}$$

19. Una gran tina de almacenamiento, de madera, tiene 6 m de diámetro exterior y está llena con 7,20 m de salmuera, de densidad relativa 1,06. Las duelas de madera están zunchadas con bandas planas de acero de 5 cm de anchura por 6 mm de espesor, y la tensión de trabajo admisible es de 11 kg/mm<sup>2</sup>. ¿Cuál debe ser el espaciado entre las bandas cercanas al fondo de la tina si se desprecian las tensiones iniciales? Referirse a la Figura 2-16.

**Solución:**

La fuerza  $P$  representa la suma de las componentes horizontales de las fuerzas elementales  $dP$  sobre la longitud  $y$  de la tina y las fuerzas  $T$  representan la fuerza de tracción total soportadas por la banda centrada sobre la misma longitud  $y$ . Como la suma de fuerzas en la dirección  $X$  debe ser igual a cero,  $2T$  (kg) –  $P$  (kg) = 0 o bien

$$2(\text{área del acero} \times \text{tensión en el acero}) = p' \times \text{proyección sobre } ZY \text{ del semicilindro}$$

De aquí,

$$2(5 \times 0,6)1100 = (1,06 \times 1000 \times 7,2/10^4)(600 \times y)$$

e

$$y = 14,40 \text{ cm de espaciado entre bandas}$$

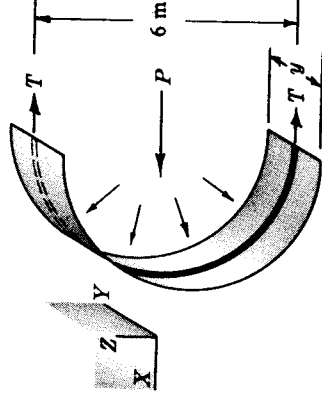


Fig. 2-16

## Problemas propuestos

20. Encontrar para la compuerta  $AB$  (Fig. 2-17) de 2,50 m de longitud la fuerza de compresión sobre el jalacón  $CD$  ejercida por la presión del agua ( $B$ ,  $C$  y  $D$  son puntos articulados).

*Sol.* 7160 kg

21. Una compuerta vertical rectangular  $AB$  de 3,6 m de altura y 1,5 m de anchura puede girar alrededor de un eje situado 15 cm por debajo del centro de gravedad de la compuerta. La profundidad total del agua es de 6 m. ¿Qué fuerza horizontal  $F$  ha de aplicarse en el fondo de la compuerta para mantener el equilibrio?

*Sol.* 1490 kg

22. Determinar el valor de  $z$  (Fig. 2-18) de forma que la fuerza total sobre la barra  $BD$  no sobrepase los 8000 kg al suponer que la longitud en dirección perpendicular al dibujo es de 1,20 m y que la barra  $BD$  está articulada en ambos extremos.

*Sol.* 1,84 m

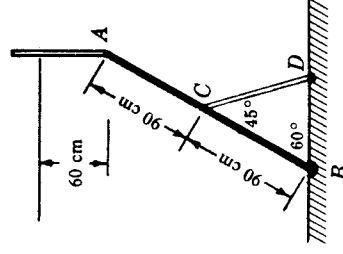


Fig. 2-17

23. Un aceite de densidad relativa 0,800 actúa sobre un área triangular vertical cuyo vértice está en la superficie libre del aceite. El triángulo tiene una altura de 2,70 m y una base de 3,60 m. Una superficie rectangular vertical de 2,40 m de altura está unida a la base de 3,60 m del triángulo y sobre ella actúa agua. Encontrar el módulo y posición de la fuerza resultante sobre la superficie total.

*Sol.* 36,029 kg a 3,57 m de profundidad

24. En la Fig. 2-19 la compuerta  $AB$  tiene su eje de giro en  $B$  y su anchura es de 1,20 m. ¿Qué fuerza vertical, aplicada en su centro de gravedad, será necesaria para mantener la compuerta en equilibrio, si pesa 2000 kg?

*Sol.* 5200 kg

25. Un depósito tiene 6 m de longitud y la sección recta mostrada en la Fig. 2-20. El agua llega al nivel  $AE$ . Determinar (a) la fuerza total que actúa sobre el lado  $BC$  y (b) el módulo y la posición de la fuerza total sobre el extremo  $ABCDE$ .

*Sol.* 86.400 kg, 42.336 kg a 3,33 m de profundidad

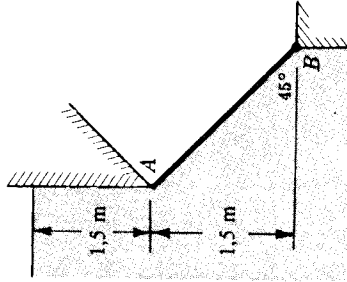


Fig. 2-19

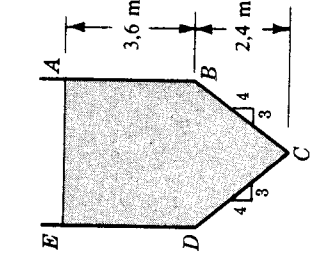


Fig. 2-20

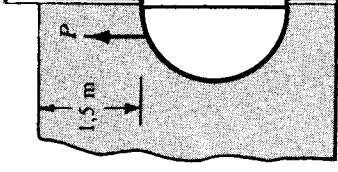


Fig. 2-21

26. En la Fig. 2-21 la compuerta semicilíndrica de 1,2 m de diámetro tiene una longitud de 1 m. Si el coeficiente de rozamiento entre la compuerta y sus guías es 0,100, determinar la fuerza  $P$  requerida para elevar la compuerta si su peso es de 500 kg. *Sol.* 187 kg

27. Un depósito de paredes laterales verticales contiene 1 m de mercurio y 5,5 m de agua. Encontrar la fuerza que actúa sobre una porción cuadrada de una de las paredes laterales, de 50 cm por 50 cm de área, la mitad de la cual está bajo la superficie de mercurio. Los lados del cuadrado están situados verticales y horizontales respectivamente. *Sol.* 1572 kg a 1,125 m de profundidad

28. Un triángulo isósceles, de base 6 m y altura 8 m, está sumergido verticalmente en un aceite de densidad relativa 0,800, con su eje de simetría horizontal. Si la altura de aceite sobre el eje horizontal es de 4,3 m, determinar la fuerza total sobre una de las caras del triángulo y localizar verticalmente el centro de presión. *Sol.* 82.560 kg, 4,65 m

29. ¿A qué profundidad se debe sumergir verticalmente en agua un cuadrado, de 4 m de lado, con dos lados horizontales, para que el centro de presión esté situado 25 cm por debajo del centro de gravedad? ¿Qué valor tendrá la fuerza total sobre una cara del cuadrado?

*Sol.* 3,33 m (lado superior), 85.330 kg

30. En la Fig. 2-22 el cilindro de 2 m de diámetro y 2 m de longitud está sometido a la acción del agua por su lado izquierdo y de un aceite de densidad relativa 0,800 por su lado derecho. Determinar (a) la fuerza normal en  $B$  si el cilindro pesa 6000 kg y (b) la fuerza horizontal debida al aceite y al agua si el nivel de aceite descende 0,50 m.

*Sol.* 350 kg, 6200 kg hacia la derecha

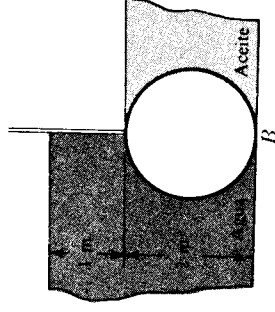


Fig. 2-22

31. En la Fig. 2-23, para una longitud de 4 m de la compuerta, determinar el momento no compensado respecto eje de giro  $O$ , debido al agua, cuando ésta alcanza el nivel  $A$ .

*Sol.* 18.000 mkg en el sentido de las agujas de un reloj

32. El depósito, cuya sección recta se muestra en la Fig. 2-24, tiene 2 m de longitud y está lleno de agua a presión. Determinar las componentes de la fuerza requerida para mantener el cilindro en su posición, despreciando peso del mismo.

*Sol.* 4690 kg hacia abajo, 6750 kg hacia la izquierda

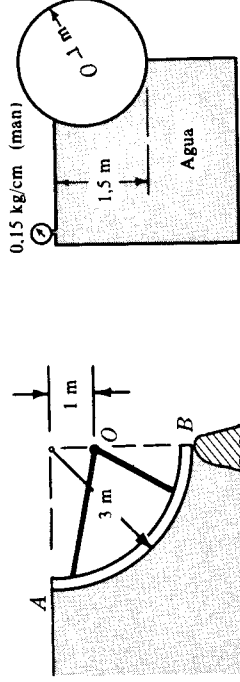


Fig. 2-23

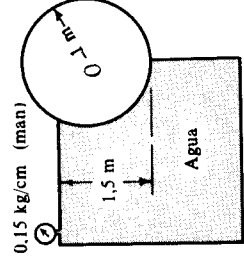


Fig. 2-24

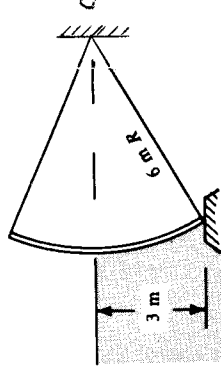


Fig. 2-25

33. Determinar las componentes horizontal y vertical, por metro de longitud, de la fuerza debida a la presión de agua sobre la compuerta del tipo Tainter mostrada en la Figura 2-25.
- Sol.* 4500 kg y 1630 kg
34. Determinar la fuerza vertical que actúa sobre la bóveda semicilíndrica mostrada en la Fig. 2-26 cuando la presión manométrica leída en  $A$  es de  $0,60 \text{ kg/cm}^2$ . La bóveda tiene 2 m de longitud.
- Sol.* 12.600 kg
35. Si la bóveda del Problema 34 es ahora hemisférica y del mismo diámetro, ¿cuál es el valor de la fuerza vertical sobre la misma?
- Sol.* 6050 kg

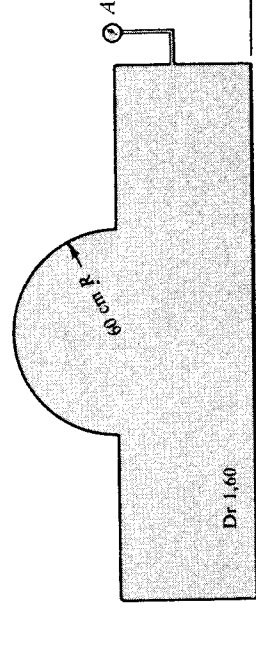


Fig. 2-26

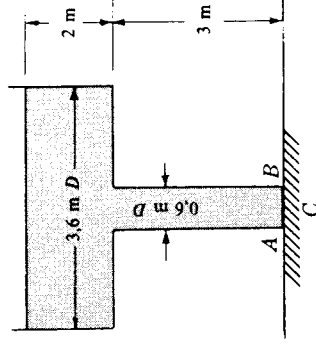


Fig. 2-27

36. Con referencia a la Fig. 2-27, determinar (a) la fuerza ejercida por el agua sobre la placa del fondo  $AB$  de la tubería de 60 cm de diámetro y (b) la fuerza total sobre el plano  $C$ .
- Sol.* 1410 kg, 21.200 kg

37. El cilindro mostrado en la Fig. 2-28 tiene 3 m de longitud. Si se supone que en  $A$  el ajuste no deja pasar el agua y que el cilindro no puede girar, ¿qué peso debe de tener el cilindro para impedir su movimiento hacia arriba?
- Sol.* 5490 kg

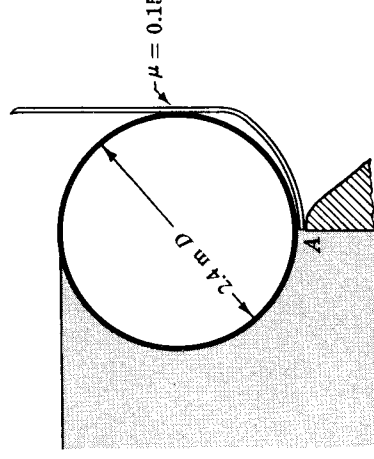


Fig. 2-28

38. Una tubería de duelas de madera, de 1 m de diámetro interior, está zunchada con aros planos constituidos por bandas de acero de 10 cm de anchura y 18 mm de espesor. Para una tensión de trabajo admisible en el acero de 12 kg/mm<sup>2</sup> y una presión en el interior de la tubería de 12 kg/cm<sup>2</sup>, determinar el espaciado entre aros.
- Sol.* 36 cm

39. En el muro de retención del agua del mar mostrado en la Fig. 2-29, ¿qué momento respecto de  $A$ , por metro de longitud del muro, se origina por la exclusiva acción de los 3 m de profundidad del agua ( $w = 1025 \text{ kg m}^3$ )?  
 Sol. 16.200 mkg de sentido contrario a las agujas de un reloj

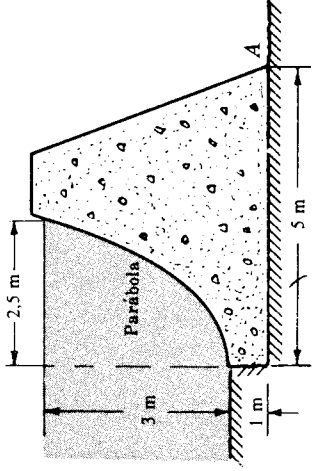


Fig. 2-29

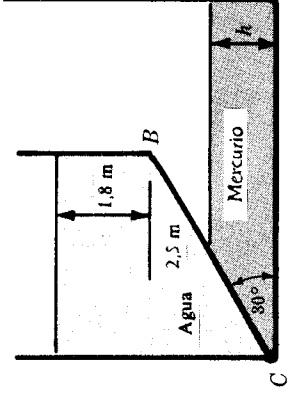


Fig. 2-30

40. El depósito mostrado en la Fig. 2-30 tiene 3 m de longitud, y el fondo inclinado  $BC$  tiene 2,5 m de anchura. ¿Qué profundidad de mercurio dará lugar a un momento respecto de  $C$ , por la acción de los dos líquidos, igual a 14.000 mkg en el sentido de las agujas de un reloj? Sol. 63 cm
41. La compuerta de la Fig. 2-31 tiene 6 m de longitud. ¿Qué valores tienen las reacciones en el eje  $O$  debidas a la acción del agua? Comprobar que el par respecto de  $O$  es nulo. Sol. 12.000 kg, 33.300 kg
42. Con referencia a la Fig. 2-32, una placa plana con un eje de giro en  $C$  tiene una forma exterior dada por la ecuación  $x^2 + 0,5y = 1$ . ¿Cuál es la fuerza del aceite sobre la placa y cuál es el momento respecto a  $C$  debido a la acción del agua? Sol. 3800 kg, 5740 mkg

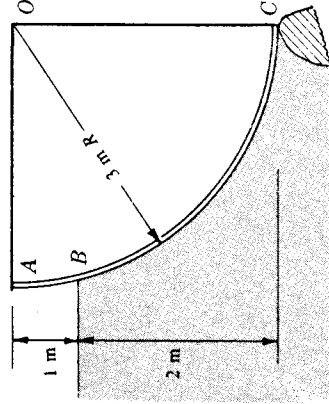


Fig. 2-31

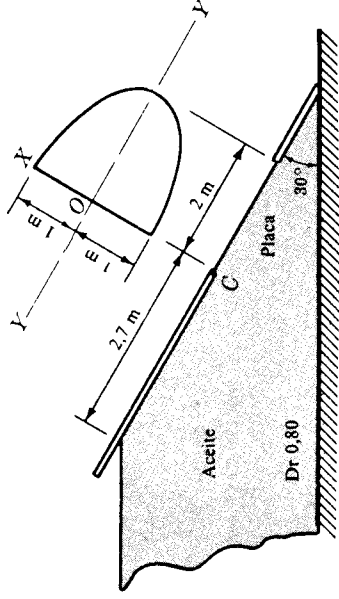


Fig. 2-32

43. En la Fig. 2-33 la compuerta  $ABC$  de forma parabólica puede girar alrededor de  $A$  y está sometida a la acción de un aceite de peso específico  $800 \text{ kg/m}^3$ . Si el centro de gravedad de la compuerta está en  $B$ , ¿qué peso debe de tener la compuerta, por metro de longitud (perpendicular al dibujo), para que esté en equilibrio? El vértice de la parábola es  $A$ . Sol. 590 kg/m
44. En la Fig. 2-34 la compuerta automática  $ABC$  pesa  $3300 \text{ kg/m}$  de longitud y su centro de gravedad está situado  $180 \text{ cm}$  a la derecha del eje de giro  $A$ . ¿Se abrirá la compuerta con la profundidad de agua que se muestra en la figura? Sol. Sí

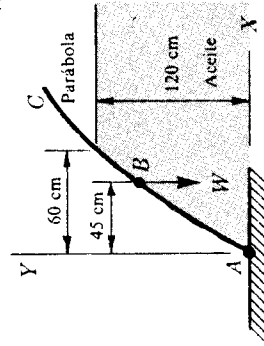


Fig. 2-33

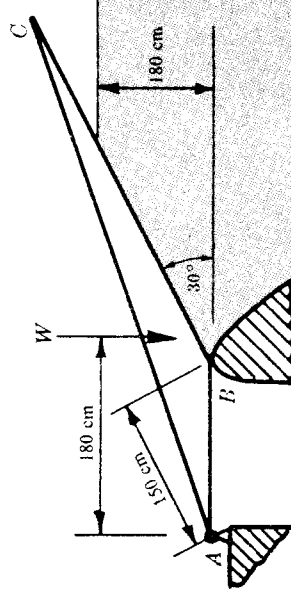


Fig. 2-34

# Capítulo 3

## Empuje y flotación

### PRINCIPIO DE ARQUIMEDES

El principio de Arquímedes viene siendo utilizado por el hombre desde hace unos 2200 años. El volumen de un sólido irregular puede determinarse midiendo la pérdida aparente de peso cuando se introduce completamente en un líquido de densidad relativa conocida. La densidad relativa de los líquidos puede determinarse por la profundidad de inmersión de un hidrómetro. Otras aplicaciones comprenden la teoría general de la flotación y problemas de ingeniería naval.

Todo cuerpo, sumergido total o parcialmente en un líquido, sufre un *empuje* vertical hacia arriba igual al peso del líquido desplazado. El punto en el que actúa la fuerza se llama centro de empuje. Coincide con el centro de gravedad del líquido desplazado.

### ESTABILIDAD DE CUERPOS SUMERGIDOS Y FLOTANTES

*Para la estabilidad de un cuerpo sumergido* el centro de gravedad debe estar directamente debajo del centro del empuje (centro de gravedad del líquido desplazado). Si los dos puntos coinciden, el cuerpo sumergido está en equilibrio indiferente.

*Para la estabilidad de cilindros y esferas flotantes* el centro de gravedad del cuerpo debe estar por debajo del centro de empuje.

*La estabilidad de otros cuerpos flotantes* depende de si se desarrolla un momento adrizante cuando el centro de gravedad y el centro de empuje se desalinean de la vertical debido al desplazamiento del centro de empuje. El centro de empuje se desplaza porque cuando el objeto flotante se inclina, varía la forma del volumen de líquido desplazado y, por tanto, su centro de gravedad pasa a otra posición

## Problemas resueltos

1. Una piedra pesa 54 kg en el aire y 24 kg cuando está sumergida en el agua. Calcular el volumen y la densidad relativa de la piedra.

#### Solución:

Todos los problemas en trabajos de ingeniería se analizan mucho mejor mediante el empleo del diagrama del cuerpo libre. Con referencia a la figura adjunta, se indica en ella el peso total de 54 kg que actúa hacia abajo, la tracción en la cuerda de unión a la balanza de 24 kg dirigida hacia arriba y el empuje  $P_V$  que actúa también hacia arriba. De

$$\Sigma Y = 0$$

se tiene

$$54 - 24 - P_V = 0 \quad \text{y} \quad P_V = 30 \text{ kg}$$

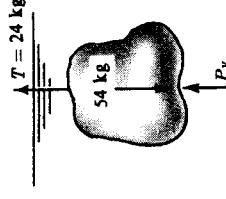


Fig. 3-1

Como el empuje = al peso del líquido desplazado,  
 $24 \text{ kg} = 1000 \text{ kg/m}^3 \times v$

$$y \quad v = 0,024 \text{ m}^3$$

$$\text{Densidad relativa} = \frac{\text{peso de la piedra}}{\text{peso de un volumen igual de agua}} = \frac{54}{24} = 2,25.$$

2. Un objeto prismático de 20 cm de espesor por 20 cm de anchura y 40 cm de longitud se pesa en el agua a una profundidad de 50 cm, dando la medida 5,0 kg. ¿Cuánto pesa en el aire y cuál es su densidad relativa?

**Solución:**

Con referencia al diagrama del cuerpo libre de la Fig. 3-2,  $\Sigma Y = 0$ ; de aquí

$$W - P_v - 5,0 = 0 \quad \text{o} \quad (I) \quad W = 5,0 + P_v$$

Empuje  $P_v$  = peso del líquido desplazado

$$= 1000(0,2 \times 0,2 \times 0,4) = 16,0 \text{ kg.}$$

Por tanto, de (I),  $W = 5 + 16 = 21 \text{ kg}$  y  $Dr = 21/16 = 1,31$

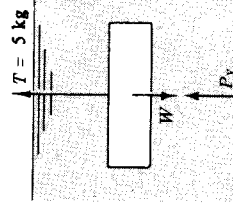


Fig. 3-2

3. Un hidrómetro pesa 2,20 g y su extremo superior es un vástago cilíndrico de 0,2800 cm de diámetro. ¿Cuál será la diferencia entre las longitudes de emergencia del vástago cuando flota en aceite de densidad relativa 0,780 y en alcohol de densidad relativa 0,821?

**Solución:**

Para la posición 1 de la Fig. 3-3 en el alcohol,

peso del hidrómetro = peso del líquido desplazado

$$0,0022 = 0,821 \times 1000 \times v_1$$

de donde  $v_1 = 0,00000268 \text{ m}^3$  (en alcohol).

Para la posición 2,

$$0,0022 = 0,780 \times 1000(v_1 + Ah)$$

$$= 0,780 \times 1000[0,00000268 + \frac{1}{4}\pi(0,28/100)^2h]$$

de donde  $h = 0,0228 \text{ m} = 2,28 \text{ cm.}$

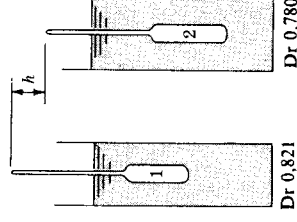


Fig. 3-3

4. Una pieza de madera de densidad relativa 0,651 es de sección cuadrada 7,50 cm de lado y 1,50 m de longitud. ¿Cuántos kilogramos de plomo de peso específico 11.200 kg/m³ deben unirse a uno de los extremos del listón de madera para que flote verticalmente con 30 cm fuera del agua?

**Solución:**

Peso total de madera y plomo = peso del agua desplazada

$$[0,651 \times 1000 \times 1,5(0,075)^2 + 11.200v] = 1000[(0,075)^2 \times 1,2 + v]$$

de donde  $v = 0,0001232 \text{ m}^3$  y peso del plomo =  $11.200v = 11.200 \times 0,0001232 = 1,38 \text{ kg.}$

5. ¿Qué fracción del volumen de una pieza sólida de metal de densidad relativa 7,25 flotará sobre la superficie del mercurio, de densidad relativa 13,57, contenido en un recipiente?

**Solución:**

El diagrama del cuerpo libre indica que de  $\Sigma Y = 0$ ,  $W - P_v = 0$  o peso del cuerpo = empuje (peso del mercurio desplazado)

$$7,25 \times 1000v = 13,57 \times 1000v'$$

y, por tanto, la relación de los volúmenes  $v'/v = 7,25/13,57 = 0,535$ .

De aquí la fracción del volumen sobre el mercurio =  $1 - 0,535 = 0,465$ .

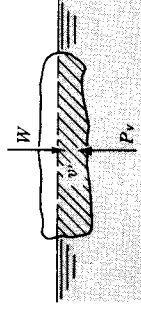


Fig. 3-4



6. Una gabarra rectangular, de 10 m por 4 m de base y 5 m de profundidad, pesa 54 toneladas y flota sobre agua dulce. (a) ¿Qué profundidad se sumerge? (b) Si el agua tiene una profundidad de 5 m, ¿qué peso de piedras debe cargarse en la gabarra para que ésta repose sobre el fondo?

**Solución:**

(a) Peso de la gabarra = peso del agua desplazada

$$54 \times 1000 = 1000(10 \times 4 \times Y)$$

$$Y = 1,35 \text{ m sumergida}$$

(b) Peso de la gabarra más las piedras = peso del agua desplazada

$$54 \times 1000 + W_s = 1000(10 \times 4 \times 5) \quad W_s = 146.000 \text{ kg de piedras}$$

7. Un bloque de madera flota en el agua sobresaliendo de la superficie 5 cm. Cuando se pone en glicerina, de densidad relativa 1,35, sobresalen 7,5 cm de la superficie del líquido. Determinar la densidad relativa de la madera.

**Solución:**

El peso total de la pieza es (a)  $W = Dr \times 1000(A \times h)$ , y los pesos del agua y la glicerina desplazados son, respectivamente, (b)  $W_w = 1000(h - 0,05)$  y (c)  $W_g = 1,35 \times 1000(h - 0,075)$ .

Como cada uno de los pesos de líquidos desplazados es igual al peso del bloque, (b) = (c), o bien,

$$1000A(h - 0,05) = 1,35 \times 1000A(h - 0,075) \quad h = 0,1464 \text{ m}$$

$$\text{Como (a) = (b),} \quad Dr \times 1000A \times 0,1464 = 1000 \times A(0,1464 - 0,05) \quad Dr = 0,660$$

8. ¿A qué profundidad se hundirá un tronco de 2,40 m de diámetro y 4,50 m de longitud, en agua dulce, si la densidad relativa de la madera es de 0,425?

**Solución:**

En la Fig. 3-5 se dibuja con el centro  $O$  del tronco sobre la superficie libre del agua, ya que su densidad relativa es menor de 0,500. Si la densidad relativa fuera 0,500 estaría sumergida la mitad del tronco.

Peso total del tronco = peso del líquido desplazado

sector - 2 triángulos

$$0,425 \times 1000 \times \pi \cdot 1,2^2 \times 4,5 = 1000 \times 4,5 \left( \frac{2\theta}{360} 1,44\pi - 2 \times \frac{1}{2} \times 1,2 \times 1,2 \sin \theta \times 1,2 \cos \theta \right)$$

Simplificando y sustituyendo  $\frac{1}{2} \sin 2\theta$  por  $\sin \theta \cos \theta$ ,

$$0,425\pi = \theta\pi/180 - \frac{1}{2} \sin 2\theta$$

Resolviendo por aproximaciones sucesivas:

$$\text{Para } \theta = 85^\circ: \quad 1,335 \stackrel{?}{=} 85\pi/180 - \frac{1}{2}(0,1737)$$

$$1,335 \neq 1,397$$

$$\text{Para } \theta = 83^\circ: \quad 1,335 \stackrel{?}{=} 1,449 - \frac{1}{2}(0,242)$$

$$1,335 \neq 1,328$$

El valor buscado está entre los dos ensayados.

$$\text{Para } \theta = 83^\circ 10': \quad 1,335 \stackrel{?}{=} 1,451 - \frac{1}{2}(0,236)$$

$$= 1,333 \text{ (suficiente aproximado).}$$

La profundidad con que flota  $DC = r - OD = 1,2 - 1,2 \cos 83^\circ 10'$

$$= 1,2(1 - 0,119) = 1,057 \text{ m.}$$

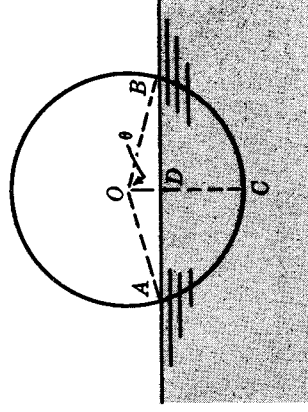


Fig. 3-5

9. (a) Despreciando el espesor de las paredes del depósito en la Fig. 3-6(a), si el depósito flota en la posición indicada, ¿cuál es su peso? (b) Si el depósito se mantiene de forma que su parte superior está 3 m por debajo de la superficie libre, ¿cuál es la fuerza que actúa sobre la parte interior de la base del depósito?

**Solución:**

(a) Peso del depósito = peso del líquido desplazado  
 $= 1000\pi(0,6^2)(0,30) = 339 \text{ kg}$

(b) El espacio ocupado por el aire será menor en la nueva profundidad, según se muestra en la Figura 3-6(b). Suponiendo que la temperatura del aire es constante, se verificará para las posiciones (a) y (b),

$$p_A v_A = p_D v_D \quad (\text{hay que utilizar presiones absolutas})$$

$$w(10,33 + 0,3)(1,2 \times \text{área}) = w(10,33 + 3 + y)(y \times \text{área})$$

de la que se deduce  $y^2 + 13,33y - 12,75 = 0$  y como la raíz ha de ser positiva  $y = 0,90 \text{ m}$ .

La presión en  $D = 3,90 \text{ m}$  de agua (man) = presión en  $E$ . De aquí, la fuerza sobre el interior del extremo superior del cilindro es  $w h A = 1000(3,9)(\pi(0,6^2)) = 4410 \text{ kg}$ .

10. Un barco, con los costados verticales a la altura de la línea de flotación, pesa 4000 toneladas y en agua salada ( $w = 1025 \text{ kg/m}^3$ ) tiene un calado de 6,60 m. Al descargar 200 toneladas la profundidad de inmersión disminuye a 6,30 m. ¿Cuál será el calado  $d$  del barco en agua dulce?

**Solución:**

Como se desconoce la forma de la parte del barco sumergida en el agua, es preferible resolver el problema a partir de los volúmenes desplazados.

En 0,30 m disminuye el calado cuando se reduce el peso en 200 toneladas o bien

$$200 \times 1000 = wv = 1025(A \times 0,3)$$

donde  $v$  representa el volumen entre los calados 6,6 y 6,3 m y  $(A \times 0,3)$  representa el área de la sección recta a la altura de la línea de agua por 0,3, es decir, el mismo volumen  $v$ . Por tanto,

$$v = A \times 0,3 = 200(1000)/1025 = 195 \text{ m}^3/0,3 \text{ m de prof.} = 650 \text{ m}^3/\text{m de prof.}$$

Empuje  $B = w \times$  volumen del líquido desplazado. Por tanto,  $B/w =$  volumen del líquido desplazado.

En la figura, el volumen con rayado vertical representa la diferencia entre los volúmenes desplazados en agua dulce y en agua salada. Esta diferencia puede expresarse en la forma  $(\frac{3800 \times 1000}{1000} - \frac{3800 \times 1000}{1025})$  y, por otra parte, es también igual a  $650y$ . Igualando estos valores,  $y = 0,154 \text{ m}$ .

El calado  $d = 6,3 + 0,154 = 6,454$  o bien 6,50 m.

11. Un barril que contiene agua pesa 128,5 kg. ¿Cuál será la lectura en una balanza si se mantiene sumergido verticalmente en el agua a una profundidad de 60 cm un listón de madera de 5 cm por 5 cm?

**Solución:**

A toda fuerza se opone otra fuerza de reacción igual y opuesta. El empuje vertical hacia arriba ejercido por

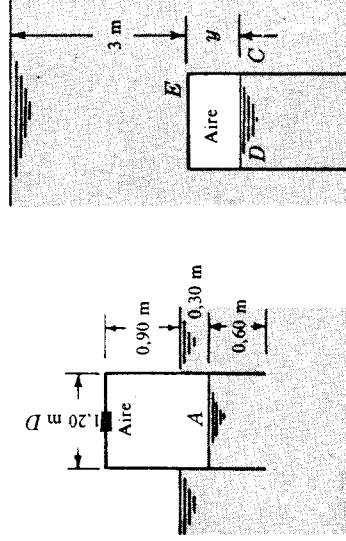


Fig. 3-6(a)

Fig. 3-6(b)

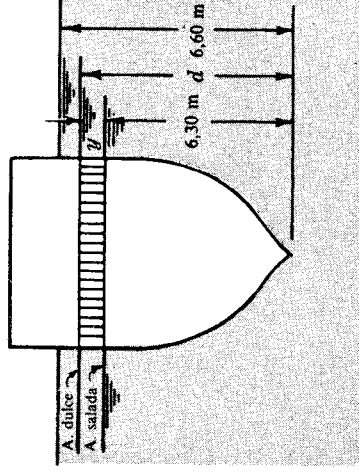


Fig. 3-7

el agua sobre la cara inferior del listón de madera da lugar a la acción ejercida por dicha área de 5 cm por 5 cm sobre el agua hacia abajo y de igual módulo. Esta fuerza dará lugar a un aumento de la lectura en la balanza.

$$P_1 = 1000 \times 0,05 \times 0,05 \times 0,60 = 1,50 \text{ kg. La lectura en la balanza} = 128,5 + 1,5 = 130,0 \text{ kg.}$$

12. Un bloque de madera de 1,80 m por 2,40 m por 3,00 m flota en un aceite de densidad relativa 0,751. Un par del sentido de las agujas de un reloj mantiene el bloque en la posición mostrada en la Figura 3-8. Determinar (a) el empuje que actúa sobre el bloque en esa posición, (b) el valor del par que actúa sobre el bloque y (c) la situación del metacentro en la posición indicada.

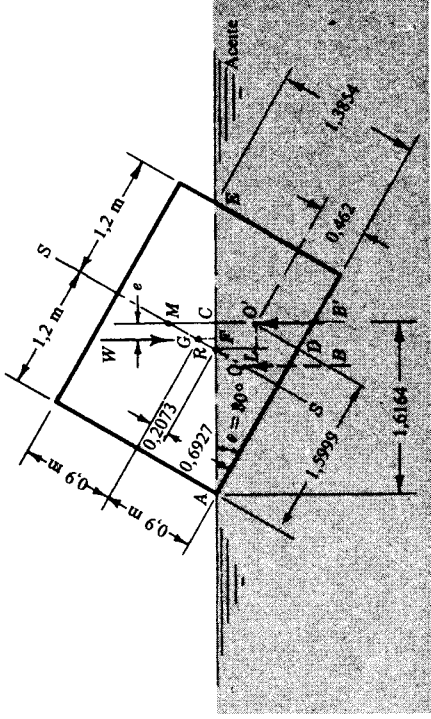


Fig. 3-8

### Solución:

- (a) Peso del bloque = peso del prisma triangular de aceite (o empuje)

$$W = B' = (0,751 \times 1000)(\frac{1}{2} \times 2,40 \times 1,3854 \times 3) = 3746 \text{ kg}$$

Por tanto,  $B' = 3746 \text{ kg}$  que actúa hacia arriba a través del centro de gravedad  $O'$  del aceite desplazado. El centro de gravedad está situado a 1,5999 m de  $A$  y 0,4620 m de  $D$ , como se muestra en la figura.

$$AC = AR + RC = AR + LO' = 1,5999 \cos 30^\circ + 0,4620 \sin 30^\circ = 1,6164 \text{ m}$$

El empuje de 3746 kg actúa hacia arriba a través del centro de gravedad del aceite desplazado, que está situado a 1,62 m a la derecha de  $A$ .

- (b) Un procedimiento para obtener el valor del par adrizante (que debe ser igual al valor del par exterior que lo mantiene en equilibrio) es el de encontrar la excentricidad  $e$ . Esta viene definida por la distancia entre las dos fuerzas  $W$  y  $B'$ , iguales y paralelas, que dan lugar al par adrizante o restaurador.

$$e = FC = AC - AF = 1,6164 - AF = 1,6164 - 1,4889 = 0,1275 \text{ m}$$

$$\text{ya que } AF = AR + RF = AR + GR \text{ sen } 30^\circ = 1,3854 + 0,2073(\frac{1}{2}) = 1,4889 \text{ m}$$

El par  $W'e$  o  $B'e = 3746 \times 0,1275 = 478 \text{ mkg}$ . Así, el momento o par para mantener el bloque en la posición mostrada es de 478 mkg del sentido de las agujas de un reloj.

- (c) El punto de intersección de la recta de acción del empuje con el eje de simetría  $S-S$  se llama metacentro (punto  $M$  de la figura). Si el metacentro está situado sobre el centro de gravedad del objeto flotante, el peso del objeto y el empuje dan lugar a un par restaurador o adrizante para posiciones inclinadas.

$$\text{La distancia metacéntrica } MG = MR - GR = \frac{RC}{\text{sen } 30^\circ} - GR = \frac{0,231}{0,5} - 0,2073 = 0,255 \text{ m.}$$

Se observará que la distancia  $MG$  multiplicada por el seno del ángulo  $\theta$  es igual a la excentricidad  $e$  (calculada anteriormente por otro procedimiento).

En ingeniería naval, un ángulo máximo de  $10^\circ$  es el que se toma como límite de escora para el que la distancia metacéntrica  $MG$  tiene que mantenerse constante. Existen fórmulas para situar exactamente la posición del metacentro, pero éstas caen fuera del objeto de una introducción a la mecánica de los fluidos.

## Problemas propuestos

13. Un objeto pesa 30 kg en el aire y 19 kg en el agua. Determinar su volumen y su densidad relativa.  
*Sol.*  $1,1 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ , 2,73
14. Un cuerpo pesa 30 kg en el aire y 19 kg sumergido en un aceite de densidad relativa 0,750. Determinar su volumen y su densidad relativa.  
*Sol.*  $1,47 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ , 2,04
15. Si el peso específico del aluminio es  $2700 \text{ kg/m}^3$ , ¿cuánto pesará una esfera de 30 cm de diámetro sumergida en agua? ¿Cuánto si está sumergida en un aceite de densidad relativa 0,750? *Sol.* 24,0 kg, 27,5 kg
16. Un cubo de aluminio de 15 cm de arista pesa 5,5 kg sumergido en el agua. ¿Qué peso aparente tendrá al sumergirlo en un líquido de densidad relativa 1,25? *Sol.* 4,66 kg
17. Un bloque de piedra pesa 60 kg y al introducirlo en un depósito cuadrado de 60 cm de lado, lleno de agua, el bloque pesa 33 kg. ¿Qué altura se elevará el agua en el depósito? *Sol.* 7,5 cm
18. Un cilindro hueco de 1 m de diámetro y 1,5 m de altura pesa 400 kg. (a) ¿Cuántos kilogramos de plomo, de peso específico  $11.200 \text{ kg/m}^3$ , deben unirse al fondo por su parte exterior para que el cilindro flote verticalmente con 1 m del mismo sumergido? (b) ¿Cuántos kilogramos se necesitarán si se colocan en el interior del cilindro? *Sol.* 423,2 kg, 385,4 kg
19. Un hidrómetro pesa 11 g y el área de la sección recta de su vástago es  $0,16 \text{ cm}^2$ . ¿Cuál es la diferencia de alturas sumergidas en dos líquidos de densidades relativas 1,25 y 0,90, respectivamente? *Sol.* 21,4 cm
20. ¿Qué longitud debe de tener un tablón de madera de 7,5 cm por 30 cm de sección y densidad relativa 0,50 en agua salada para soportar encima a un niño que pesa 45 kg? *Sol.* 3,81 m
21. Un cuerpo que tiene un volumen de  $170 \text{ dm}^3$  requiere una fuerza de 27 kg para mantenerlo sumergido en el agua. Si para mantenerlo sumergido en otro líquido se necesita una fuerza de 16 kg, ¿cuál es la densidad relativa de este último líquido? *Sol.* 0,935
22. Una gabarra de 3 m de profundidad tiene una sección recta trapezoidal de bases superior e inferior 9 m y 6 m, respectivamente. La gabarra tiene 15 m de longitud y las caras de popa y proa son verticales. Determinar (a) su peso si la altura sumergida en agua es de 1,8 m y (b) la profundidad de calado si la gabarra transporta 86 toneladas de piedra. *Sol.* 186.300 kg, 2,50 m
23. Una esfera de 120 cm de diámetro flota en agua salada ( $w = 1025 \text{ kg/m}^3$ ), la mitad de ella sumergida. ¿Qué peso mínimo de cemento ( $w = 2400 \text{ kg/m}^3$ ), utilizado como anclaje, será necesario para sumergir completamente la esfera? *Sol.* 810 kg
24. Un iceberg de peso específico  $912 \text{ kg/m}^3$  flota en el océano ( $1025 \text{ kg/m}^3$ ), emergiendo del agua un volumen de  $600 \text{ m}^3$ . ¿Cuál es el volumen total del iceberg? *Sol.*  $5440 \text{ m}^3$
25. Un globo vacío y su equipo pesan 50 kg. Al inflarlo con un gas de peso específico  $0,553 \text{ kg/m}^3$  el globo adopta forma esférica de 6 m de diámetro. ¿Cuál es la máxima carga que puede elevar el globo, suponiendo un peso específico del aire igual a  $1,230 \text{ kg/m}^3$ ? *Sol.* 26,5 kg.
26. Un flotador cúbico de 120 cm de lado pesa 180 kg y se ancla mediante un bloque de cemento que pesa 680 kg en el aire. La boya está sumergida 23 cm cuando la cadena que la une al bloque de cemento está tensa. ¿Qué subida del nivel de agua hará separarse del fondo al bloque de cemento? El peso específico del cemento es de  $2400 \text{ kg/m}^3$ . *Sol.* 17,10 cm
27. Una gabarra, de forma paralelepípedica rectangular de dimensiones 6 m de anchura, 18 m de longitud y 3 m de altura, pesa 160.000 kg. Flota en agua salada ( $w = 1025 \text{ kg/m}^3$ ) y el centro de gravedad cargado está 1,35 m por debajo de la parte superior de la gabarra. (a) Situar el centro de empuje cuando flota horizontalmente en agua tranquila, (b) cuando ha girado  $10^\circ$  alrededor del eje longitudinal y (c) determinar el metacentro para la inclinación de  $10^\circ$ . *Sol.* 0,722 m del fondo y sobre el eje, 0,362 m del eje, 1,152 m sobre el CG
28. Un cubo de aluminio de 15 cm de lado está suspendido de un resorte. La mitad del cubo está sumergido en aceite de densidad relativa 0,80 y la otra mitad en agua. Determinar la fuerza de tracción en el resorte si el peso específico del aluminio es de  $2640 \text{ kg/m}^3$ . *Sol.* 5,87 kg
29. Si el cubo del problema anterior estuviera sumergido la mitad en aceite y la otra mitad en el aire, ¿qué valor tendría la fuerza de tracción sobre el resorte? *Sol.* 7,56 kg

# Capítulo 4

## Traslación y rotación de masas líquidas

### INTRODUCCION

Un fluido puede estar animado de un movimiento de traslación o rotación, sometido a una aceleración constante, sin movimiento relativo entre sus partículas. Esta es una de las condiciones de equilibrio relativo y el fluido está libre de tensiones cortantes. En general no existirá movimiento entre el fluido y el recipiente que lo contiene. Son aplicables aún los principios de la estática, modificado para tener en cuenta los efectos de la aceleración.

### MOVIMIENTO HORIZONTAL

En el caso de un movimiento horizontal la superficie libre del líquido adopta una posición inclinada y plana. La pendiente del plano se determina mediante

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{a \text{ (aceleración lineal del recipiente, m/seg}^2\text{)}}{g \text{ (aceleración de la gravedad, m/seg}^2\text{)}}$$

La deducción de la ecuación general para la traslación se da en el Problema 4.

### MOVIMIENTO VERTICAL

Para el movimiento vertical la presión ( $\text{kg/m}^2$ ) en un punto cualquiera del líquido viene dada por

$$p = wh \left( 1 \pm \frac{a}{g} \right)$$

en la que el signo positivo se aplica cuando la aceleración es hacia arriba y el negativo cuando la aceleración constante es hacia abajo.

### ROTACION DE MASAS FLUIDAS. RECIPIENTES ABIERTOS

La forma de la superficie libre de un líquido que gira con el recipiente que lo contiene es un paraboloide de revolución. Cualquier plano vertical que pasa por el eje de revolución corta a la superficie libre según una parábola. La ecuación de esta parábola es

$$y = \frac{\omega^2}{2g} x^2$$

donde  $x$  e  $y$  son las coordenadas, en metros, de un punto genérico de la superficie, medidas con el origen en el vértice situado en el eje de revolución, y  $\omega$  la velocidad angular constante, medida en radianes por segundo. La demostración de esta fórmula se da en el Problema 7.

### ROTACION DE MASAS FLUIDAS. RECIPIENTES CERRADOS

En los recipientes cerrados aumenta la presión al girar los recipientes. (Véase también Capítulo

lo 12.) El aumento de presión entre un punto situado en el eje y otro a una distancia de  $x$  metros del eje, en el mismo plano horizontal, es

$$p \text{ (kg/m}^2\text{)} = w \frac{\omega^2}{2g} x^2$$

y el aumento de la altura de presión (m) será

$$\frac{p}{w} = y = \frac{\omega^2}{2g} x^2$$

que es una ecuación análoga a la aplicable a recipientes abiertos en rotación. Como la velocidad lineal  $V = x\omega$ , el término  $x^2\omega^2/2g = V^2/2g$  da la altura de velocidad, en m, como se verá más adelante.

## Problemas resueltos

1. Un depósito rectangular de 8 m de longitud, 3 m de profundidad y 2 m de anchura contiene 1,5 m de agua. Si está sometido a una aceleración horizontal en la dirección de su longitud de 2,45 m/seg<sup>2</sup>, (a) calcular la fuerza total sobre cada uno de los extremos del depósito debido a la acción del agua y (b) demostrar que la diferencia entre estas fuerzas es igual a la fuerza no equilibrada, necesaria para acelerar la masa líquida. Referirse a la Figura 4-1.

**Solución:**

$$(a) \quad \operatorname{tg} \theta = \frac{\text{aceleración lineal}}{\text{aceleración de la gravedad}} = \frac{2,45}{9,80} = 0,250 \quad y \quad \theta = 14^\circ 2'$$

A partir de la figura, la profundidad  $d$  en el extremo de menor profundidad es  $d = 1,5 - y = 1,5 - 4 \operatorname{tg} 14^\circ 2' = 0,500$  m, y en el extremo más profundo será 2,50 m. Por tanto,

$$P_{AB} = w h_{cg} A = 1000(2,50/2)(2,50 \times 2) = 6250 \text{ kg}$$

$$P_{CD} = w h_{cg} A = 1000(0,500/2)(0,500 \times 2) = 250 \text{ kg}$$

$$(b) \quad \text{Fuerza necesaria} = \text{masa del agua} \times \text{aceleración lineal} = \frac{8 \times 2 \times 1,5 \times 1000}{9,80} \times 2,45 = 6000 \text{ kg,}$$

y  $P_{AB} - P_{CD} = 6250 - 250 = 6000$  kg, que coincide con el valor anterior.

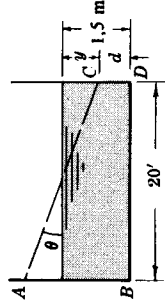


Fig. 4-1

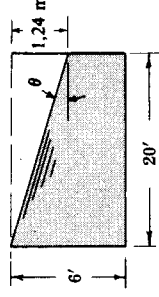


Fig. 4-2

2. Si el depósito del Problema 1 se llena de agua y se acelera en la dirección de su longitud a 1,52 m/seg<sup>2</sup>, ¿cuántos litros de agua se verterán del depósito? Referirse a la Figura 4-2.

**Solución:**

Pendiente de la superficie =  $\operatorname{tg} \theta = 1,52/9,8 = 0,155$ , y la diferencia de niveles entre los extremos de la superficie =  $8 \operatorname{tg} \theta = 1,24$  m.

$$\begin{aligned} \text{Volumen derramado} &= 2 \times \text{sección recta triangular mostrada en la Figura 4-2} \\ &= 2\left(\frac{1}{2} \times 8 \times 1,24\right) = 9,92 \text{ m}^3 = 9920 \text{ l.} \end{aligned}$$

3. Un depósito de base cuadrada de 1,50 m de lado contiene 1 m de agua. ¿Qué altura deben de tener sus lados para que no se derrame agua al someterlo a una aceleración de  $3,66 \text{ m/seg}^2$  en dirección paralela a un par de lados?

**Solución:**

Pendiente de la superficie =  $\operatorname{tg} \theta = 3,66/9,8 = 0,373$ .

Elevación (o descenso) de la superficie =  $0,75 \operatorname{tg} \theta = 0,75 \times 0,373 = 0,28 \text{ m}$ .

El depósito debe tener al menos  $1 + 0,28 = 1,28 \text{ m}$  de profundidad.

4. Un recipiente que contiene agua se acelera paralelamente y hacia arriba de un plano inclinado  $30^\circ$ , con el horizontal a  $3,66 \text{ m/seg}^2$ . ¿Qué ángulo formará la superficie libre con la horizontal?

**Solución:**

Con referencia a la figura, las fuerzas que actúan sobre cada partícula  $dM$  son su peso  $W$ , vertical y dirigido hacia abajo, y la fuerza  $P$  ejercida por el resto de partículas que la rodean. Esta fuerza  $P$  es normal a la superficie, ya que no actúan fuerzas cortantes. La fuerza resultante  $F_x$  (debida a  $W$  y  $P$ ) sobre cada partícula de líquido debe ser paralela al plano  $XX$ , que forma un ángulo de  $\alpha = 30^\circ$  con el horizontal, y estar dirigida hacia arriba, de forma que dé lugar a la aceleración común  $a_x$ . La Fig. 4-3(b) muestra el diagrama vectorial correspondiente. Ahora pueden establecerse las relaciones siguientes:

$$(1) \quad F_x = \frac{W}{g} a_x \quad \text{o} \quad \frac{F_x}{W} = \frac{a_x}{g}$$

$$(2) \quad F_x \operatorname{sen} \alpha = P \cos \theta - W$$

$$(3) \quad F_x \cos \alpha = P \operatorname{sen} \theta \quad \text{del diagrama vectorial}$$

Multiplicando (2) por  $\operatorname{sen} \theta$  y (3) por  $\cos \theta$  y operando, se llega a

$$F_x \operatorname{sen} \alpha \operatorname{sen} \theta + W \operatorname{sen} \theta - F_x \cos \alpha \cos \theta = 0 \quad \text{y} \quad \frac{F_x}{W} = \frac{\operatorname{sen} \theta}{\cos \alpha \cos \theta - \operatorname{sen} \alpha \operatorname{sen} \theta}$$

Sustituyendo en (1) y simplificando,

$$(4) \quad \frac{a_x}{g} = \frac{1}{\cos \alpha \operatorname{ctg} \theta - \operatorname{sen} \alpha} \quad \text{de la que por ser } \alpha = 30^\circ$$

$$(A) \quad \operatorname{ctg} \theta = \operatorname{tg} 30^\circ + \frac{g}{a_x \cos 30^\circ} = 0,577 + \frac{9,80}{3,66 \times 0,866} = 3,68 \quad \text{y} \quad \theta = 15^\circ 12'$$

*Nota:* Para un plano horizontal, el ángulo  $\alpha$  es igual a  $0^\circ$  y la ecuación (4) se transforma en  $a/g = \operatorname{tg} \theta$ , que es la ecuación dada para el movimiento con aceleración horizontal. Para una aceleración paralela al plano, pero dirigida hacia abajo, la  $\operatorname{tg} 30^\circ$  de la ecuación (A) lleva un signo menos delante.

5. Un depósito cúbico está lleno con 1,50 m de aceite de  $D_r 0,752$ . Determinar la fuerza que actúa sobre uno de los lados del depósito (a) cuando se somete a una aceleración vertical y dirigida hacia arriba de  $4,90 \text{ m/seg}^2$  y (b) cuando la aceleración de  $4,90 \text{ m/seg}^2$  es vertical y dirigida hacia abajo.

**Solución:**

- (a) La Fig. 4-4 muestra la distribución de presiones sobre el lado vertical  $AB$ . En  $B$  el valor de la presión en  $\text{kg/m}^2$  es

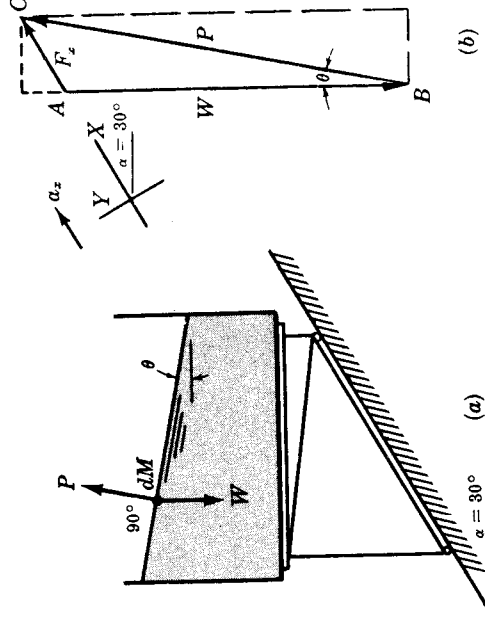


Fig. 4-3

$$p_B = wh\left(1 + \frac{a}{g}\right) = 0,752 \times 1000(1,5)\left(1 + \frac{4,9}{9,8}\right) = 1692 \text{ kg/m}^2$$

Fuerza  $P_{AB}$  = área del diagrama de carga  $\times 1,5 \text{ m}$  de longitud  
 $= \left(\frac{1}{2} \times 1692 \times 1,5\right)(1,5) = 1900 \text{ kg}$

Otra forma de hallarla sería

$$P_{AB} = wh_{cg}A = p_{cg}A = \left[0,752 \times 1000(0,75)\left(1 + \frac{4,9}{9,8}\right)\right](1,5 \times 1,5) = 1900 \text{ kg}$$

$$(b) \quad P_{AB} = \left[0,752 \times 1000(0,75)\left(1 - \frac{4,9}{9,8}\right)\right](1,5 \times 1,5) = 635 \text{ kg}$$

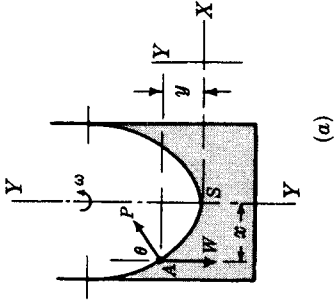
6. Determinar la presión en el fondo del depósito del Problema 5 cuando está sometido a una aceleración vertical hacia abajo de  $9,80 \text{ m/seg}^2$ .

**Solución:**

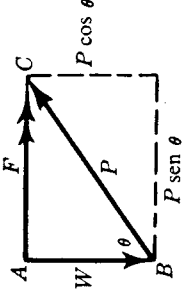
De aquí, para una masa líquida en caída libre, la presión en el interior de su masa, en cualquier punto, es nula, es decir, igual a la presión atmosférica de los alrededores. Esta conclusión es importante al considerar corrientes de agua que caen libremente a través de la atmósfera.

$$p_B = 0,752 \times 1000(1,5)(1 - 9,8/9,8) = 0 \text{ kg/m}^2$$

7. Un recipiente abierto, parcialmente lleno de un líquido, gira alrededor de su eje vertical con una velocidad angular constante. Determinar la ecuación de la superficie libre del líquido cuando éste haya adquirido la velocidad angular del recipiente.



(a)



(b)

Fig. 4-5

**Solución:**

En la Fig. 4-5(a) se representa una sección del recipiente sometido a rotación y una partícula genérica  $A$  situada a una distancia  $x$  del eje de rotación. Las fuerzas que actúan sobre la masa  $A$  son su peso  $W$ , vertical y dirigido hacia abajo, y  $P$  que es normal a la superficie libre del líquido, ya que no existen tensiones cortantes. La aceleración de la masa  $A$  es  $x\omega^2$ , dirigida hacia el eje de rotación. La resultante de las fuerzas  $W$  y  $P$  debe actuar en la misma dirección que esta aceleración, como se muestra en la Figura 4-5(b).

Del segundo principio de Newton,  $F_x = Ma_x$     o    (1)  $P \sen \theta = \frac{W}{g} x\omega^2$

De  $\Sigma Y = 0$

$$(2) \quad P \cos \theta = W$$

Dividiendo (1) por (2),

$$(3) \quad \tg \theta = \frac{x\omega^2}{g}$$

Ahora bien,  $\theta$  es también el ángulo entre el eje  $X$  y la tangente en  $A$  a la curva, Fig. 4-5a. La pendiente de esta tangente es  $\tg \theta$  o bien  $dy/dx$ . Sustituyendo este valor en (3)

$$\frac{dy}{dx} = \frac{x\omega^2}{g} \quad \text{de la cual, por integración,} \quad y = \frac{\omega^2}{2g} x^2 + C_1$$

Para calcular la constante de integración  $C_1$ : Cuando  $x = 0$ ,  $y = 0$  debe ser  $C_1 = 0$ .



8. Un depósito cilíndrico abierto, de 2 m de altura y 1 m de diámetro, contiene 1,5 m de agua. Si el cilindro gira alrededor de su eje geométrico, ( $\omega$ ) ¿qué velocidad angular se puede alcanzar sin que se derrame nada de agua? (b) ¿Cuál es la presión en el fondo del depósito en  $C$  y  $D$  cuando  $\omega = 6,00$  rad/seg?

**Solución:**

(a) Volumen del paraboloide de revolución =  $\frac{1}{2}$ (volumen del cilindro circunscrito) =  $\frac{1}{2}[4\pi l^2(0,5 + y_1)]$

Si no se derrama líquido, este volumen ha de ser igual al volumen sobre el nivel original del agua  $A-A$ , es decir,

$$\frac{1}{2}[4\pi l^2(0,5 + y_1)] = \frac{1}{2}\pi l^2(0,5)$$

e  $y_1 = 0,5$  m.

Para generalizar, el punto de la superficie libre en el eje de rotación descende una altura igual a la elevación que sufren los puntos del líquido en contacto con las paredes del recipiente.

A partir de esta información, las coordenadas  $x$  e  $y$  de los puntos  $B$  son, respectivamente, 0,50 y 1,00 m, tomando el origen en  $S$ . Por tanto,

$$y = \frac{\omega^2}{2g} x^2$$

$$1,00 = \frac{\omega^2}{2 \times 9,8} (0,50)^2$$

de donde,  $\omega = 8,86$  rad/seg.

(b) Para  $\omega = 6,00$  rad/seg,

$$y = \frac{\omega^2}{2g} x^2 = \frac{(6)^2}{2(9,8)} (0,5)^2 = 0,458 \text{ m de } S$$

El origen  $S$  cae  $\frac{1}{2}y = 0,229$  m y  $S$ , por tanto, está a  $1,50 - 0,229 = 1,271$  m del fondo del depósito. En las paredes del depósito la profundidad =  $1,271 + 0,458 = 1,729$  m (o bien  $1,50 + 0,229 = 1,729$  m).

En  $C$ ,  $p_c = \rho h = 1000 \times 1,271 = 1271$  kg/m<sup>2</sup>

En  $D$ ,  $p_D = \rho h = 1000 \times 1,729 = 1729$  kg/m<sup>2</sup>

9. Considérese el depósito del Problema 8 cerrado y con el aire sobre la superficie libre a una presión de  $1,09$  kg/cm<sup>2</sup>. Cuando la velocidad angular es de  $12,0$  rad/seg, ¿cuáles son las presiones, en kg/cm<sup>2</sup>, en los puntos  $C$  y  $D$  de la Figura 4-7?

**Solución:**

Como no hay variación de volumen en el aire interior al recipiente,

volumen sobre el nivel  $A-A$  = volumen del paraboloide

o bien (1)  $\frac{1}{4}\pi l^2 \times 0,50 = \frac{1}{2}\pi x_2^2 y_2$

Además (2)  $y_2 = \frac{(12,0)^2}{2(9,8)} x_2^2$

Resolviendo el sistema de ecuaciones simultáneas (1) y (2),  $x_2^2 = 0,034$ . De donde  $x_2 = 0,43$  m e  $y_2 = 1,35$  m.

A partir de la figura,  $S$  está situada a  $2,00 - 1,35 = 0,65$  m sobre  $C$ . Por tanto,

$p_c' = 1,09 + \rho h/10^4 = 1,09 + 1000(0,65)/10^4 = 1,155$  kg/cm<sup>2</sup>

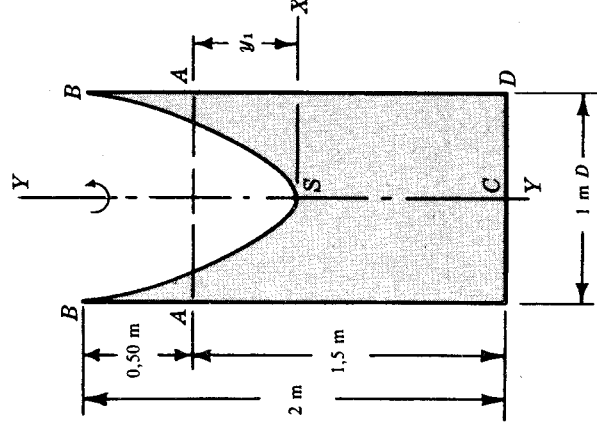


Fig. 4-6

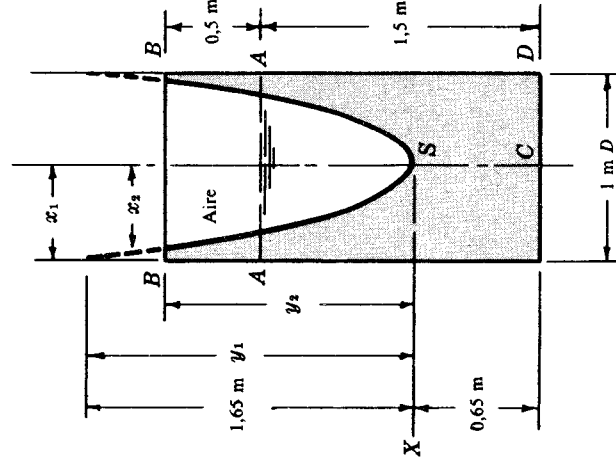


Fig. 4-7

Para calcular la presión en  $D$ , la altura de presión es  $y_1 = \frac{(12,0)^2}{2 \times 9,8} (0,5)^2 = 1,65$  m sobre  $S$  y

$$p_D' = 1000(1,65 + 0,65)/10^4 + 1,09 = 1,320 \text{ kg/cm}^2$$

10. (a) ¿A qué velocidad debe girar el depósito del Problema 9 para que el centro del fondo tenga una profundidad de agua igual a cero? (b) Si la pared lateral del depósito tiene un espesor de 6 mm, ¿cuál será la tensión que soporta a la altura del fondo?

**Solución:**

- (a) El origen  $S$  coincidirá ahora con el punto  $C$  de la Figura 4-7.

Volumen sobre la superficie del líquido = volumen del paraboloide

o bien  $(1) \quad \frac{1}{4}\pi l^2 \times 0,50 = \frac{1}{2}\pi x_2^2(2,00)$

Además  $(2) \quad y_2 = 2,00 = \frac{\omega^2}{2 \times 9,8} x_2^2$

De (1) y (2) se obtiene  $\omega^2 = 313,6$  y  $\omega = 17,7$  rad/seg.

$$(b) \quad p_D' = 1,09 + \frac{wh}{10^4}, \quad \text{donde } h = y_1 = \frac{(17,7)^2(0,5)^2}{2 \times 9,8} = 4,0 \text{ m},$$

$$= 1,09 + \frac{1000 \times 4}{10^4} = 1,49 \text{ kg/cm}^2. \quad \text{La tensión en } D = \sigma_D = \frac{p'r}{t} = \frac{1,49 \times 50}{0,6} = 124 \text{ kg/cm}^2.$$

11. Un depósito cilíndrico cerrado de 2 m de altura y 1 m de diámetro contiene 1,50 m de agua. Cuando gire a una velocidad angular constante de 20,0 rad/seg, ¿qué área del fondo quedará al descubierto?

**Solución:**

Con el fin de determinar la parábola dibujada en la figura adjunta hay que determinar primero el valor de  $y_3$ . Ahora bien,

$$y_3 = \frac{(20)^2}{2 \times 9,8} (0,50)^2 = 5,10 \text{ m}$$

con lo que puede dibujarse la superficie del agua, mostrando que  $S$  está por debajo del fondo del depósito. Ahora,

$$(1) \quad y_1 = \frac{(20)^2}{2 \times 9,8} x_1^2$$

$$(2) \quad y_2 = 2 + y_1 = \frac{(20)^2}{2 \times 9,8} x_2^2, \text{ y como el volumen del aire es constante,}$$

$$(3) \quad \frac{1}{4}\pi l^2 \times 0,50 = \text{volumen (paraboloide } SAB - \text{paraboloide } SCD) = \frac{1}{2}\pi x_2^2 y_2 - \frac{1}{2}\pi x_1^2 y_1.$$

Sustituyendo los valores de (1) y (2) y despejando,

$$x_1^2 = 0,0136 \quad y \quad x_1 = 0,1166 \text{ m.}$$

De donde área descubierta =  $\pi(0,1166)^2 = 0,0428 \text{ m}^2$ .

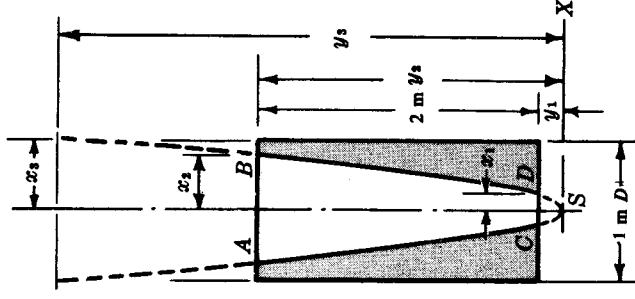


Fig. 4-8

12. Un cilindro cerrado de 1,80 m de diámetro y 2,70 m de altura está completamente lleno de glicerina,  $D_r = 1,60$ , bajo una presión en el extremo superior de  $2,50 \text{ kg/cm}^2$ . Las chapas de que está formado el cilindro tienen 13 mm de espesor y son de acero con una tensión de trabajo admisible de  $850 \text{ kg/cm}^2$ . ¿A qué velocidad máxima, en rpm, puede girar el cilindro?

**Solución:**

A partir de las especificaciones del cilindro y de la fórmula que da la tensión circunferencial  $\sigma = p'r/t$ ,

$$p'_A = \sigma t/r = 850(1,3)/90 = 12,30 \text{ kg/cm}^2$$

Además,  $p'_A = \Sigma$  presiones (2,50 impuesta + debida a los 2,70 m de glicerina + debida a la rotación)

$$\text{o bien } 12,30 = 2,50 + \frac{1,60 \times 1000 \times 2,70}{10^4} + \frac{\omega^2}{2 \times 9,8} \times 0,9^2 \times \frac{1,60 \times 1000}{10^4} \text{ kg/cm}^2$$

Despejando,  $\omega = 37,58 \text{ rad/seg}$  o bien 360 rpm.

Las condiciones de presión se representan gráficamente, aunque no a escala, en la Fig. 4-9. La horizontal  $RST$  indica la altura de presión de 15,6 m de la glicerina, antes de la rotación, en la parte superior del depósito. La curva que da la distribución parabólica de presiones con vértice en  $S$  es producida por la velocidad angular constante de 37,58 rad/seg. Si el recipiente estuviese lleno, pero sin presión, el vértice  $S$  estaría situado en la parte superior e interior al recipiente.

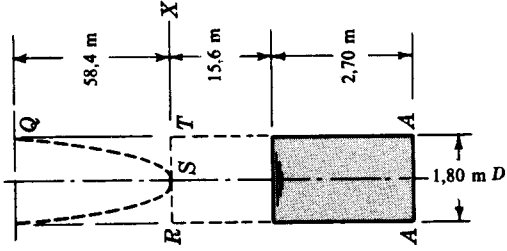


Fig. 4-9

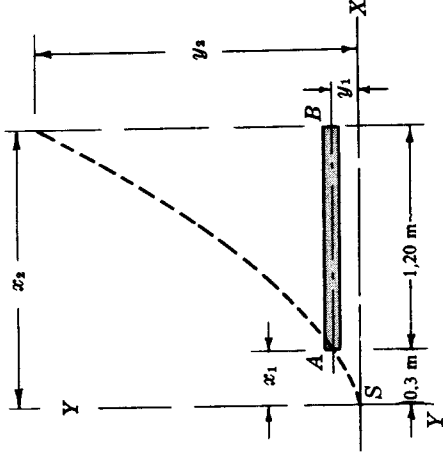


Fig. 4-10

13. Un tubo de 7,50 cm de diámetro y 1,20 m de longitud se llena con un aceite de Dr 0,822 y a continuación se cierra en sus dos extremos. Puesto en posición horizontal, se le hace girar a 27,5 rad/seg alrededor de un eje que dista 30 cm de uno de los extremos. ¿Qué presión se desarrollará en el extremo del tubo más alejado del eje, medida en kg/cm<sup>2</sup>?

**Solución:**

Como se hizo notar anteriormente, la presión aumenta a lo largo de la longitud  $AB$  en la Fig. 4-10 por la rotación. Para algún valor de la velocidad de giro el aumento de la presión tiende a comprimir el elemento de líquido, haciendo disminuir la presión en  $A$ . Como los líquidos son prácticamente incompresibles, la rotación ni hará aumentar ni disminuir la presión en  $A$ . Entre  $A$  y  $B$  la presión aumentará proporcionalmente al cuadrado de la distancia al eje  $YY$ .

Para calcular la presión en  $B$ :

$$(1) \quad y_1 = \frac{(27,5)^2}{2g} \times 0,3^2 = 3,47 \text{ m} \quad (2) \quad y_2 = \frac{(27,5)^2}{2g} \times 1,5^2 = 86,8 \text{ m}$$

$$y \quad p'_B = 0,822(1000)(86,8 - 3,47)/10^4 = 6,85 \text{ kg/cm}^2$$

## Problemas propuestos

14. Un recipiente parcialmente lleno de agua está sometido horizontalmente a una aceleración constante. La inclinación de la superficie libre es de  $30^\circ$ . ¿A qué aceleración está sometido el recipiente? *Sol.*  $5,66 \text{ m/seg}^2$
15. Un depósito abierto de sección cuadrada de 1,80 m de lado pesa 350 kg y contiene 90 cm de agua. Está sometido a la acción de una fuerza no equilibrada de 1060 kg, paralela a uno de los lados. ¿Cuál debe ser la altura de las paredes del depósito para que no se derrame el agua? ¿Qué valor tiene la fuerza que actúa sobre la pared donde la profundidad es mayor? *Sol.* 1,192 m, 1280 kg
16. Un depósito abierto de 9,00 m de longitud, 1,20 m de anchura y 1,20 m de profundidad está lleno con 1,00 m de aceite de  $D_r = 0,822$ . Se acelera en la dirección de su longitud uniformemente desde el reposo hasta una velocidad de 14 m/seg. ¿Cuál es el intervalo de tiempo mínimo para acelerar el depósito hasta dicha velocidad sin que se derrame el líquido? *Sol.* 32,1 seg
17. Un depósito rectangular abierto de 1,50 m de anchura, 3,00 m de longitud y 1,80 m de profundidad, que contiene 1,20 m de agua, se acelera horizontalmente, paralelo a su longitud, a  $4,90 \text{ m/seg}^2$ . ¿Qué volumen de agua se derrama? *Sol.*  $0,675 \text{ m}^3$
18. ¿A qué aceleración debe someterse el depósito del problema anterior para que sea nula la profundidad en la arista anterior? *Sol.*  $5,88 \text{ m/seg}^2$
19. Un depósito abierto, que contiene agua, está sometido a una aceleración de  $4,90 \text{ m/seg}^2$  hacia abajo sobre un plano inclinado  $15^\circ$ . ¿Cuál es el ángulo de inclinación de la superficie libre? *Sol.*  $23,9^\circ$
20. Un recipiente que contiene aceite de densidad relativa 0,762 se mueve verticalmente hacia arriba con una aceleración de  $+2,45 \text{ m/seg}^2$ . ¿Qué presión existe a una profundidad de 180 cm? *Sol.*  $1715 \text{ kg/m}^2$
21. Si en el Problema 20 la aceleración es de  $-2,45 \text{ m/seg}^2$ , ¿cuál es la presión a una profundidad de 180 cm? *Sol.*  $1029 \text{ kg/m}^2$
22. Una fuerza vertical no equilibrada y dirigida hacia arriba, de módulo 30 kg, acelera un volumen de 45 l de agua. Si el agua ocupa una profundidad de 90 cm en un depósito cilíndrico, ¿cuál es la fuerza que actúa sobre el fondo del depósito? *Sol.* 75 kg
23. Un depósito abierto cilíndrico de 120 cm de diámetro y 180 cm de profundidad se llena de agua y se le hace girar a 60 rpm. ¿Qué volumen de líquido se derrama y cuál es la profundidad en el eje? *Sol.*  $0,410 \text{ m}^3$ ,  $1,074 \text{ m}$
24. ¿A qué velocidad debe girar el depósito del Problema 23 para que en el centro del fondo del depósito la profundidad del agua sea nula? *Sol.* 9,90 rad/seg
25. Un recipiente cerrado, de 60 cm de diámetro, está totalmente lleno de agua. Si el recipiente está girando a 1200 rpm, ¿qué incremento sufrirá la presión en la circunferencia de la parte superior del depósito? *Sol.*  $7,25 \text{ kg/cm}^2$
26. Un recipiente abierto de 46 cm de diámetro y lleno de agua está girando alrededor de su eje vertical a tal velocidad que la superficie del agua a 10 cm del eje forma un ángulo de  $40^\circ$  con la horizontal. Calcular la velocidad de rotación. *Sol.* 9,07 rad/seg
27. Un tubo en U con codos en ángulo recto tiene 32 cm de anchura y contiene mercurio que asciende 24 cm en cada rama cuando el tubo está en reposo. ¿A qué velocidad debe girar el tubo alrededor de un eje vertical, que dista 8 cm de uno de los brazos, para que el tubo del brazo más próximo al eje quede sin mercurio? *Sol.* 15,65 rad/seg
28. Un tubo de 2 m de longitud y 5 cm de diámetro tiene sus extremos cerrados y está lleno de agua a una presión de  $0,88 \text{ kg/cm}^2$ . Situado en posición horizontal se le hace girar alrededor de un eje vertical que pasa por uno de sus extremos a una velocidad de 3 rad/seg. ¿Cuál será la presión en el extremo más alejado del eje de giro? *Sol.*  $9412 \text{ kg/m}^2$
29. El impulsor de 1,50 m de diámetro de una bomba centrífuga de agua gira a 1500 rpm. Si el cuerpo de la bomba está totalmente lleno de agua, ¿qué altura de presión se desarrolla por la rotación? *Sol.* 700 m

# Capítulo 5

## Análisis dimensional y semejanza hidráulica

### INTRODUCCION

La teoría matemática y los resultados experimentales han desarrollado soluciones prácticas de muchos problemas hidráulicos. En la actualidad numerosas estructuras hidráulicas se proyectan y construyen solo después de haber efectuado un amplio estudio sobre modelos. La aplicación del análisis dimensional y de la semejanza hidráulica permite al ingeniero organizar y simplificar las experiencias, así como el análisis de los resultados obtenidos.

### ANALISIS DIMENSIONAL

El análisis dimensional trata de las relaciones matemáticas de las dimensiones de las magnitudes físicas y constituye otra herramienta muy útil de la moderna mecánica de los fluidos. En toda ecuación que exprese una relación física entre magnitudes debe verificarse la igualdad al sustituir las magnitudes por sus valores numéricos y también por sus dimensiones. En general, todas las relaciones físicas pueden reducirse a una relación entre las magnitudes fundamentales, fuerza  $F$ , longitud  $L$  y tiempo  $T$  (o bien la masa  $M$ , longitud  $L$  y tiempo  $T$ ). Entre las aplicaciones se incluyen (1) conversión de un sistema de unidades en otro, (2) desarrollo de ecuaciones, (3) reducción del número de variables requeridas en un programa experimental y (4) establecimiento de los principios para el diseño de modelos.

El teorema de Pi de Buckingham se establecerá e ilustrará en los Problemas 13 a 17.

### MODELOS HIDRAULICOS

Los modelos hidráulicos, en general, pueden ser o bien modelos verdaderos o modelos distorsionados. Los modelos verdaderos tienen todas las características significativas del prototipo reproducidas a escala (semejanza geométrica) y satisfacen todas las restricciones de diseño (semejanza cinemática y dinámica). El estudio comparativo entre modelo y prototipo ha mostrado con evidencia que la correspondencia de comportamiento es frecuentemente buena, fuera de las limitaciones esperadas como lo atestigua el correcto funcionamiento de muchas estructuras diseñadas a partir de ensayos sobre modelos.

### SEMEJANZA GEOMETRICA

Entre el modelo y el prototipo existe semejanza geométrica cuando las relaciones entre todas las dimensiones correspondientes u homólogos en modelo y prototipo son iguales. Tales relaciones pueden escribirse

$$\frac{L_{\text{modelo}}}{L_{\text{prototipo}}} = L_{\text{rel.}} \quad \text{o} \quad \frac{L_m}{L_p} = L_r \quad (1)$$

y

$$\frac{A_{\text{modelo}}}{A_{\text{prototipo}}} = \frac{L_{\text{modelo}}^2}{L_{\text{prototipo}}^2} = L_{\text{rel.}}^2 = L_r^2 \quad (2)$$

## SEMEJANZA CINEMATICA

Entre modelo y prototipo existe semejanza cinemática si (1) las trayectorias de las partículas móviles homólogos son geoméricamente semejantes y (2) las relaciones entre las velocidades de las partículas homólogos son iguales. A continuación se dan las siguientes relaciones útiles:

$$\text{Velocidad:} \quad \frac{V_m}{V_p} = \frac{L_m/T_m}{L_p/T_p} = \frac{L_m}{L_p} : \frac{T_m}{T_p} = \frac{L_r}{T_r} \quad (3)$$

$$\text{Aceleración:} \quad \frac{a_m}{a_p} = \frac{L_m/T_m^2}{L_p/T_p^2} = \frac{L_m}{L_p} : \frac{T_m^2}{T_p^2} = \frac{L_r}{T_r^2} \quad (4)$$

$$\text{Caudal:} \quad \frac{Q_m}{Q_p} = \frac{L_m^3/T_m}{L_p^3/T_p} = \frac{L_m^3}{L_p^3} : \frac{T_m}{T_p} = \frac{L_r^3}{T_r} \quad (5)$$

## SEMEJANZA DINAMICA

Entre dos sistemas semejantes geométrica y cinemáticamente existe semejanza dinámica si las relaciones entre las fuerzas homólogas en modelo y prototipo son las mismas.

Las condiciones requeridas para la semejanza completa se obtienen a partir del segundo principio del movimiento de Newton,  $\Sigma F_x = M a_x$ . Las fuerzas que actúan pueden ser cualquiera de las siguientes, o una combinación de las mismas: fuerzas viscosas, fuerzas debidas a la presión, fuerzas gravitatorias, fuerzas debidas a la tensión superficial y fuerzas elásticas. Entre modelo y prototipo se desarrolla la siguiente relación de fuerzas:

$$\begin{aligned} \Sigma \text{ fuerzas (viscosas} \leftrightarrow \text{de presión} \leftrightarrow \text{gravitatorias} \leftrightarrow \text{tensión superf.} \leftrightarrow \text{elásticas})_m &= \frac{M_m a_m}{\Sigma \text{ fuerzas (viscosas} \leftrightarrow \text{de presión} \leftrightarrow \text{gravitatorias} \leftrightarrow \text{tensión superf.} \leftrightarrow \text{elásticas})_p} = \frac{M_m a_m}{M_p a_p} \end{aligned}$$

LA RELACION ENTRE LAS FUERZAS DE INERCIA se desarrolla en la siguiente forma:

$$F_r = \frac{\text{fuerza}_{\text{modelo}}}{\text{fuerza}_{\text{prototipo}}} = \frac{M_m a_m}{M_p a_p} = \frac{\rho_m L_m^3}{\rho_p L_p^3} \times \frac{L_r}{T_r^2} = \rho_r L_r^2 \left( \frac{L_r}{T_r} \right)^2 \quad (6)$$

Esta ecuación expresa la ley general de la semejanza dinámica entre modelo y prototipo y se la conoce con el nombre de ecuación newtoniana.

RELACION DE LAS FUERZAS DE INERCIA A LAS DE PRESION (número de Euler). Viene dada por (utilizando  $T = L/V$ )

$$\frac{M a}{\rho A} = \frac{\rho L^3 \times L/T^2}{\rho L^2} = \frac{\rho L^4 (V^2/L^2)}{\rho L^2} = \frac{\rho L^2 V^2}{\rho L^2} = \frac{\rho V^2}{p} \quad (7)$$

RELACION DE LAS FUERZAS DE INERCIA A LAS VISCOSAS (número de Reynolds). Se obtiene a partir de

$$\frac{M a}{\tau A} = \frac{M a}{\mu \left( \frac{dV}{dy} \right) A} = \frac{\rho L^2 V^2}{\mu \left( \frac{V}{L} \right) L^2} = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (8)$$

### RELACION DE LAS FUERZAS DE INERCIA A LAS GRAVITATORIAS. Se obtiene de

$$\frac{Ma}{Mg} = \frac{\rho L^2 V^2}{\rho L^3 g} = \frac{V^2}{Lg} \quad (9)$$

La raíz cuadrada de esta relación,  $\frac{V}{\sqrt{Lg}}$ , se llama *número de Froude*.

**RELACION DE LAS FUERZAS DE INERCIA A LAS ELASTICAS** (*número de Cauchy*). Se obtiene a partir de

$$\frac{Ma}{EA} = \frac{\rho L^2 V^2}{E L^2} = \frac{\rho V^2}{E} \quad (10)$$

La raíz cuadrada de esta relación,  $\frac{V}{\sqrt{E/\rho}}$ , se llama *número de Mach*.

**RELACION DE LAS FUERZAS DE INERCIA A LA DE LA TENSION SUPERFICIAL** (*número de Weber*). Se obtiene de

$$\frac{Ma}{\sigma L} = \frac{\rho L^2 V^2}{\sigma L} = \frac{\rho L V^2}{\sigma} \quad (11)$$

En general, el ingeniero estudia únicamente los efectos de la fuerza predominante. En la mayoría de los problemas de flujos fluidos son fuerzas predominantes las de la gravedad, viscosidad y/o elasticidad, pero no necesariamente de forma simultánea. En este libro se tratarán únicamente los casos en que una sola fuerza predominante influye sobre la configuración del flujo, mientras que el resto de las fuerzas producen efectos despreciables o que se compensan. Si son varias las fuerzas que simultáneamente influyen en las condiciones del flujo, el problema se complica en exceso, quedando fuera del propósito de este texto. Los Problemas 21 y 34 sugieren posibilidades.

### RELACION DE TIEMPOS

Las relaciones de tiempos establecidas para configuraciones del flujo gobernadas esencialmente por la viscosidad, o por la gravedad, o por la tensión superficial, o bien por la elasticidad, son, respectivamente,

$$T_r = \frac{L_r^2}{\nu_r} \quad (\text{véase Problema 20}) \quad (12)$$

$$T_r = \sqrt{\frac{L_r}{g_r}} \quad (\text{véase Problema 18}) \quad (13)$$

$$T_r = \sqrt{L_r^3 \times \frac{\rho_r}{\sigma_r}} \quad (14)$$

$$T_r = \frac{L_r}{\sqrt{E_r/\rho_r}} \quad (15)$$

## Problemas resueltos

1. Expresar cada una de las siguientes magnitudes (a) en función de la fuerza  $F$ , la longitud  $L$  y del tiempo  $T$  y (b) en función de la masa  $M$ , la longitud  $L$  y el tiempo  $T$ .

**Solución:**

| Magnitud  | Símbolo  | (a)<br>$F$ - $L$ - $T$ | (b)<br>$M$ - $L$ - $T$ |
|---|----------|------------------------|------------------------|
| (a) Área $A$ en $m^2$                                 | $A$      | $L^2$                  | $L^2$                  |
| (b) Volumen $v$ en $m^3$                              | $v$      | $L^3$                  | $L^3$                  |
| (c) Velocidad $V$ en $m/seg$                          | $V$      | $L T^{-1}$             | $L T^{-1}$             |
| (d) Aceleración $a$ o $g$ en $m/seg^2$                | $a, g$   | $L T^{-2}$             | $L T^{-2}$             |
| (e) Velocidad angular $\omega$ en $rad/seg$           | $\omega$ | $T^{-1}$               | $T^{-1}$               |
| (f) Fuerza $F$ en $kg$                                | $F$      | $F$                    | $M L T^{-2}$           |
| (g) Masa $M$ en $kg \text{ seg}^2/m$                  | $M$      | $F T^2 L^{-1}$         | $M$                    |
| (h) Peso específico $w$ en $kg/m^3$                   | $w$      | $F L^{-3}$             | $M L^{-2} T^{-2}$      |
| (i) Densidad $\rho$ en $kg \text{ seg}^2/m^4$         | $\rho$   | $F T^2 L^{-4}$         | $M L^{-3}$             |
| (j) Presión $p$ en $kg/m^2$                           | $p$      | $F L^{-2}$             | $M L^{-1} T^{-2}$      |
| (k) Viscosidad absoluta $\mu$ en $kg \text{ seg}/m^2$ | $\mu$    | $F T L^{-2}$           | $M L^{-1} T^{-1}$      |
| (l) Viscosidad cinemática $\nu$ en $m^2/seg$          | $\nu$    | $L^2 T^{-1}$           | $L^2 T^{-1}$           |
| (m) Módulo de elasticidad $E$ en $kg/m^2$             | $E$      | $F L^{-2}$             | $M L^{-1} T^{-2}$      |
| (n) Potencia $P$ en $kgm/seg$                         | $P$      | $F L T^{-1}$           | $M L^2 T^{-3}$         |
| (o) Par $T$ en $mkg$                                  | $T$      | $F L$                  | $M L^2 T^{-2}$         |
| (p) Caudal $Q$ en $m^3/seg$                           | $Q$      | $L^3 T^{-1}$           | $L^3 T^{-1}$           |
| (q) Tensión cortante $\tau$ en $kg/m^2$               | $\tau$   | $F L^{-2}$             | $M L^{-1} T^{-2}$      |
| (r) Tensión superficial $\sigma$ en $kg/m$            | $\sigma$ | $F L^{-1}$             | $M T^{-2}$             |
| (s) Peso $W$ en $kg$                                  | $W$      | $F$                    | $M L T^{-2}$           |
| (t) Caudal en peso $W$ en $kg/seg$                    | $W$      | $F T^{-1}$             | $M L T^{-3}$           |

2. Desarrollar una expresión que dé la distancia recorrida en el tiempo  $T$  por un cuerpo que cae libremente, suponiendo que la distancia depende del peso del cuerpo, de la aceleración de la gravedad y del tiempo.

**Solución:**

$$\begin{aligned} \text{Distancia } s &= f(W, g, T) \\ s &= K W^a g^b T^c \end{aligned}$$

donde  $K$  es un coeficiente adimensional que se determina por lo general experimentalmente.

Esta ecuación ha de ser dimensionalmente homogénea. Los exponentes de cada una de las magnitudes deben ser iguales en los dos miembros de la ecuación. Se puede escribir

$$F^0 L^1 T^0 = (F^a) (L^b T^{-2b}) (T^c)$$

Igualando los exponentes de  $F$ ,  $L$  y  $T$ , respectivamente, se obtiene  $0 = a$ ,  $1 = b$  y  $0 = -2b + c$ , de donde  $a = 0$ ,  $b = 1$  y  $c = 2$ . Sustituyendo,

$$s = K W^0 g T^2 \quad \text{o} \quad s = K g T^2$$

Obsérvese que el exponente del peso  $W$  es cero, lo que significa que la distancia recorrida es independiente del peso. El coeficiente  $K$  se determina por análisis físico y/o por experimentación.



3. El *número de Reynolds* es una función de la densidad, la viscosidad y la velocidad del fluido, así como de una longitud característica. Establecer la expresión del *número de Reynolds* mediante el análisis dimensional.

**Solución:**

$$R_E = f(\rho, \mu, V, L)$$

$$R_E = K \rho^a \mu^b V^c L^d$$

$$\text{De aquí, dimensionalmente, } F^0 L^0 T^0 = (F^a T^{2a} L^{-1a})(F^b T^b L^{-2b})(L^c T^{-c})(L^d)$$

Igualando, respectivamente, los exponentes de  $F$ ,  $L$  y  $T$ , se obtiene

$$0 = a + b, \quad 0 = -4a - 2b + c + d, \quad 0 = 2a + b - c$$

de la cual  $a = -b$ ,  $c = -b$ ,  $d = -b$ . Sustituyendo,

$$R_E = K \rho^{-b} \mu^b V^{-b} L^{-b} = K \left( \frac{V L \rho}{\mu} \right)^{-b}$$

Los valores de  $K$  y  $b$  tienen que determinarse por análisis físico y/o por experimentación. Aquí,  $K = 1$  y  $b = -1$ .

4. Para el caso de un líquido ideal, expresar el caudal  $Q$  a través de un orificio en función de la densidad del líquido, el diámetro del orificio y la diferencia de presiones.

**Solución:**

$$Q = f(\rho, p, d)$$

$$Q = K \rho^a p^b d^c$$

$$\text{De aquí, dimensionalmente, } F^0 L^3 T^{-1} = (F^a T^{2a} L^{-4a})(F^b L^{-2b})(L^c)$$

$$\text{y } 0 = a + b, \quad 3 = -4a - 2b + c, \quad -1 = -2a$$

de donde  $a = -\frac{1}{2}$ ,  $b = \frac{1}{2}$ ,  $c = 2$ . Sustituyendo,

$$Q = K \rho^{-1/2} p^{1/2} d^2$$

$$\text{(ideal)} \quad Q = K d^2 \sqrt{p/\rho}$$

El coeficiente  $K$  ha de obtenerse mediante el análisis físico y/o por experimentación.

Para un orificio en la pared lateral de un depósito y bajo una altura de carga  $h$ ,  $p = w h$ . Para obtener la conocida fórmula del caudal desaguado por un orificio, que se dará en el Capítulo 9, se pone  $K = \sqrt{2} (\pi/4)$ . Por tanto,

$$\text{(ideal)} \quad Q = \sqrt{2} (\pi/4) d^2 \sqrt{w h / \rho}$$

Pero  $g = w/\rho$ ; de donde

$$\text{(ideal)} \quad Q = \frac{1}{4} \pi d^2 \sqrt{2 g h}$$

5. Determinar la presión dinámica ejercida sobre un cuerpo totalmente sumergido en la corriente de un fluido incompresible al suponer que la presión es función de la densidad y de la velocidad.

**Solución:**

$$p = f(\rho, V)$$

$$p = K \rho^a V^b$$

$$\text{De aquí, dimensionalmente, } F^1 L^{-2} T^0 = (F^a T^{2a} L^{-4a})(L^b T^{-b})$$

$$\text{y } 1 = a, \quad -2 = -4a + b, \quad 0 = 2a - b, \quad \text{de donde } a = 1, \quad b = 2. \text{ Sustituyendo,}$$

$$p = K \rho V^2$$

6. Suponiendo que la potencia comunicada a una bomba es función del peso específico del fluido, del caudal en  $m^3/\text{seg}$  y de la altura comunicada a la corriente, establecer una ecuación por análisis dimensional.

**Solución:**

$$P = f(w, Q, H)$$

$$P = K w^a Q^b H^c$$

o

$$\text{De aquí, dimensionalmente,} \quad F^1 L^1 T^{-1} = (F^a L^{-3a})(L^{3b} T^{-b})(L^c)$$

$$\text{y } 1 = a, \quad 1 = -3a + 3b + c, \quad -1 = -b, \quad \text{de donde } a = 1, \quad b = 1, \quad c = 1. \text{ Sustituyendo,}$$

$$P = K w Q H$$

7. Se dispara un proyectil con un ángulo  $\theta$  y una velocidad inicial  $V$ . Encontrar el alcance  $R$  en el plano horizontal, suponiéndolo función de  $V$ ,  $\theta$  y de  $g$ .

$$R = f(V, g, \theta) \quad (A)$$

$$L^1 = (L^a T^{-a})(L^b T^{-b})(L^c T^{-2c}) \quad (B)$$

Dimensionalmente,

Como  $\theta$  es adimensional, no aparece en la ecuación (B).

Despejando  $a$  y  $b$ ,  $a = 2$  y  $b = -1$ . Sustituyendo,  $R = K V^2/g$ . Evidentemente, esta ecuación es incorrecta ya que carece de la variable  $\theta$ . En el Problema 8 se muestra cómo obtener una solución correcta.

8. Resolver el Problema 7 mediante una descomposición vectorial.

**Solución:**

En los casos de movimientos bidimensionales pueden introducirse las componentes según  $X$  o  $Y$  para obtener una solución más completa. Así, la ecuación (A) del Problema 7 puede escribirse

$$R_x = K V_x^a V_y^b g^c \theta^d$$

$$L_x^1 = (L_x^a T^{-a})(L_y^b T^{-b})(L_g^c T^{-2c}) \quad (C)$$

que da

$$L_x: 1 = a$$

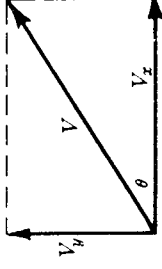
$$T: 0 = -a - b - 2c$$

$$L_y: 0 = b + c$$

De aquí,  $a = 1$ ,  $b = 1$  y  $c = -1$ . Sustituyendo en (C),

$$R = K \left( \frac{V_x V_y}{g} \right) \quad (D)$$

Fig. 5-1



A partir del diagrama vectorial,  $\cos \theta = V_x/V$ ,  $\text{sen } \theta = V_y/V$  y  $\cos \theta \text{ sen } \theta = V_x V_y/V^2$ . Sustituyendo en (D),

$$R = K \frac{V^2 \cos \theta \text{ sen } \theta}{g} = K \frac{V^2 \text{ sen } 2\theta}{2g} \quad (E)$$

Por mecánica,  $R$  toma la forma  $\frac{V^2 \text{ sen } 2\theta}{g}$ ; de donde  $K = 2$  en la ecuación (E).

9. Suponiendo que la fuerza de arrastre ejercida sobre un cuerpo sumergido en una corriente fluida es función de la densidad, la viscosidad y la velocidad del fluido, y de una longitud característica del cuerpo, desarrollar la ecuación general.

**Solución:**

$$F = f(\rho, \mu, L, V)$$

$$F = K \rho^a \mu^b L^c V^d$$

o

$$\text{De aquí,} \quad F^1 L^0 T^0 = (F^a T^{2a} L^{-4a})(F^b T^b L^{-2b})(L^c)(L^d T^{-d})$$

$$\text{y } 1 = a + b, \quad 0 = -4a - 2b + c + d, \quad 0 = 2a + b - d.$$

Se observa que hay más exponentes desconocidos que ecuaciones. Un procedimiento de resolución consiste en expresar tres de las incógnitas en función de la cuarta. Resolviendo en función de  $b$ , se obtiene

$$a = 1 - b, \quad d = 2 - b, \quad c = 2 - b$$

Sustituyendo,

$$F = K \rho^{1-b} \mu^b L^{2-b} V^{2-b}$$

Con el fin de expresar esta ecuación en la forma comúnmente usada, se multiplica por  $2/2$  y se ordenan términos, obteniendo:

$$F = 2 K \rho \left( \frac{V L \rho}{\mu} \right)^{-b} L^2 \frac{V^2}{2}$$

Como se ve  $\frac{V L \rho}{\mu}$  es el *número de Reynolds* y  $L^2$  representa un área, y se puede poner

$$F = [2K R_E^{-b}] \rho A \frac{V^2}{2} \quad 0 \quad F = C_D \rho A \frac{V^2}{2}$$

- 10.** Desarrollar una expresión para la tensión cortante en una corriente fluida en una tubería suponiendo que la tensión es función del diámetro y de la rugosidad de la tubería, y de la densidad, la viscosidad y la velocidad del fluido.

**Solución:**

$$\tau = f(V, d, \rho, \mu, K)$$

o

$$\tau = C V^a d^b \rho^c \mu^d K^e$$

La rugosidad  $K$  se expresa normalmente como la relación entre la altura de las protuberancias superficiales de la tubería y su diámetro,  $\epsilon/d$ , que es un número adimensional.

$$\text{Por tanto,} \quad F^1 L^{-2} T^0 = (L^a T^{-a})(L^b)(F^c T^{2c} L^{-4c})(F^d T^d L^{-2d})(L^e/L^e)$$

y  $1 = c + d, \quad -2 = a + b - 4c - 2d + e - e, \quad 0 = -a + 2c + d$ . Resolviendo en función de  $d$ , se obtiene

$$c = 1 - d, \quad a = 2 - d, \quad b = -d$$

Sustituyendo,

$$\tau = C V^{2-d} d^{-d} \rho^{1-d} \mu^d K^e$$

Reuniendo términos,

$$\tau = C \left( \frac{V d \rho}{\mu} \right)^{-d} K^e V^2 \rho$$

o

$$\tau = (C' R_E^{-d}) V^2 \rho$$

- 11.** Desarrollar una expresión que dé la pérdida de carga en una tubería horizontal, para un flujo turbulento incompresible.

**Solución:**

Para un fluido cualquiera la pérdida de carga viene dada por la caída de presión y es una medida de la resistencia presentada al flujo a través de la tubería. La resistencia es una función del diámetro de la tubería, la viscosidad y la densidad del fluido, la longitud de la tubería, la velocidad del fluido y la rugosidad  $K$  de la tubería. Se puede escribir

$$(p_1 - p_2) = f(d, \mu, \rho, L, V, K)$$

o

$$(p_1 - p_2) = C d^a \mu^b \rho^c L^d V^e (\epsilon/d)^f$$

A partir de datos experimentales se ve que el exponente de la longitud  $L$  es la unidad. El valor de  $K$  se expresa usualmente como la relación entre el tamaño de las protuberancias superficiales  $\epsilon$  y el diámetro  $d$  de la tubería, resultando adimensional. Se puede escribir, por tanto,

$$F^1 L^{-2} T^0 = (L^a)(F^b T^b L^{-2b})(F^c T^{2c} L^{-4c})(F^d T^d L^{-2d})(L^e T^{-e})(L^f/L^f)$$

y  $1 = b + c$ ,  $-2 = a - 2b - 4c + 1 + e + f - f$ ,  $0 = b + 2c - e$ , a partir de las cuales se pueden determinar los valores de  $a$ ,  $b$  y  $c$  en función de  $e$  o bien

$$c = e - 1, \quad b = 2 - e, \quad a = e - 3$$

Sustituyendo en (1),

$$(p_1 - p_2) = C d^{e-3} \mu^{2-e} \rho^{e-1} L^1 V^e (\epsilon/d)^f$$

Dividiendo el primer miembro de la ecuación por  $w$  y el segundo por su equivalente  $\rho g$ ,

$$\frac{p_1 - p_2}{w} = \text{pérdida de carga} = \frac{C (\epsilon/d)^f L (d^{e-3} V^e \rho^{e-1} \mu^{2-e})}{\rho g}$$

que puede transformarse en (al introducir 2 en el numerador y en el denominador)

$$\begin{aligned} \text{pérdida de carga} &= 2 C \left(\frac{\epsilon}{d}\right)^f \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g} \left[ \frac{d^{e-2} V^{e-2} \rho^{e-2}}{\mu^{e-2}} \right] \\ &= K' (Re^{-3}) \left(\frac{L}{d}\right) \left(\frac{V^2}{2g}\right) = f \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g} \quad (\text{fórmula de Darcy}) \end{aligned}$$

12. Establecer una expresión para la potencia de entrada en una hélice al suponer que la potencia puede expresarse en función de la densidad del aire, el diámetro, la velocidad de la corriente de aire, la velocidad de rotación, el coeficiente de viscosidad y la velocidad del sonido.

**Solución:**

$$\text{Potencia} = K \rho^a d^b V^c \omega^d \mu^e c^f$$

y, utilizando como unidades fundamentales la masa, la longitud y el tiempo,

$$M L^2 T^{-3} = (M^c L^{-3a})(L^b)(L^c T^{-c})(T^{-d})(M^e L^{-e} T^{-e})(L^f T^{-f})$$

$$\begin{aligned} 1 &= a + e & a &= 1 - e \\ 2 &= -3a + b + c - e + f & b &= 5 - 2e - c - f \\ -3 &= -c - d - e - f & d &= 3 - c - e - f \end{aligned}$$

De aquí,

$$\text{Potencia} = K \rho^{1-e} d^{5-2e-c-f} V^e \omega^{3-e-e-f} \mu^e c^f$$

Sustituyendo,

Ordenando y reuniendo términos con los mismos exponentes, se obtiene

$$\text{Potencia} = K \left[ \left( \frac{\rho d^2 \omega}{\mu} \right)^{-e} \left( \frac{d \omega}{V} \right)^{-c} \left( \frac{d \omega}{c} \right)^{-f} \right] \omega^3 d^5 \rho$$

Al observar los términos entre paréntesis se ve que todos son adimensionales. El primer factor puede escribirse como un *número de Reynolds*, ya que velocidad lineal = radio  $\times$  velocidad angular. El segundo factor es una relación adimensional característica de la hélice y el tercer factor, cociente de la velocidad a la celeridad del sonido, es el número de Mach. Combinando todos estos términos se llega a la ecuación

$$\text{Potencia} = C' \rho \omega^3 d^5$$

13. Resumir el procedimiento a seguir para aplicar el Teorema de Pi de Buckingham.

**Introducción:**

Cuando el número de variables o magnitudes físicas son cuatro o más, el Teorema de Pi de Buckingham constituye una excelente herramienta, mediante la cual pueden agruparse estas magnitudes en un número menor de grupos adimensionales significativos, a partir de los cuales puede establecerse una ecuación. Los grupos adimensionales se llaman grupos o números Pi. Si en el fenómeno físico en cuestión intervienen  $n$  magnitudes físicas  $q$  de las cuales  $k$  son dimensiones fundamentales (por ejemplo, fuerza, longitud y tiempo, o bien masa, longitud y tiempo) y otras  $q$  (tales como velocidad, densidad, viscosidad, presión y área), entonces matemáticamente

$$f_1(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n) = 0$$

Y esta ecuación puede remplazarse por la relación

$$\phi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-k}) = 0$$

donde cualquier número  $\pi$  no depende más que de  $(k + 1)$  magnitudes físicas  $q$  y cada uno de los números  $\pi$  son funciones monómicas independientes, adimensionalmente, de las magnitudes  $q$ .

#### Procedimiento:

1. Se escriben las  $n$  magnitudes físicas  $q$ , que intervienen en un problema en particular, anotando sus dimensiones y el número  $k$  de dimensiones fundamentales. Existirán  $(n - k)$  números  $\pi$ .
  2. Seleccionar  $k$  de estas magnitudes, sin que haya ninguna sin dimensiones, ni dos que tengan las mismas dimensiones. Todas las dimensiones fundamentales deben incluirse colectivamente en las magnitudes seleccionadas.
  3. El primer grupo  $\pi$  puede expresarse como el producto de las magnitudes escogidas, elevada cada una a un exponente desconocido, y una de las otras magnitudes elevada a una potencia conocida (normalmente se toma igual a uno).
  4. Mantener las magnitudes escogidas en (2) como variables *repetidas* y escoger una de las restantes variables para establecer el nuevo número  $\pi$ . Repetir el procedimiento para obtener los sucesivos números  $\pi$ .
  5. En cada uno de los grupos  $\pi$  determinar los exponentes desconocidos mediante el análisis dimensional.
- Relaciones útiles:**
- (a) Si una magnitud es adimensional constituye un grupo  $\pi$  sin necesidad de aplicar el procedimiento anterior.
  - (b) Si dos magnitudes físicas cualesquiera tienen las mismas dimensiones su cociente será un número adimensional  $\pi$ . Por ejemplo,  $L/L$  es adimensional y, por tanto, un número  $\pi$ .
  - (c) Cualquier número  $\pi$  puede ser sustituido por una potencia del mismo, incluida  $\pi^{-1}$ . Por ejemplo,  $\pi_3$  puede remplazarse por  $\pi_3^2$ , o  $\pi_2$  por  $1/\pi_2$ .
  - (d) Cualquier número  $\pi$  puede sustituirse por su producto por una constante numérica. Por ejemplo,  $\pi_1$  puede remplazarse por  $3\pi_1$ .
  - (e) Cualquier número  $\pi$  puede expresarse como función de otros números  $\pi$ . Por ejemplo, si hay dos números  $\pi$ ,  $\pi_1, \pi_2 = \phi(\pi_2)$ .

#### 14. Resolver el Problema 2 mediante el Teorema de Pi de Buckingham.

##### Solución:

El problema puede resolverse estableciendo que cierta función de la distancia  $s$ , el peso  $W$ , la aceleración de la gravedad  $g$  y el tiempo  $T$  es igual a cero, o bien matemáticamente

$$f_1(s, W, g, T) = 0$$

##### Paso 1

Se enumeran las magnitudes y sus unidades.

$$s = \text{longitud } L, \quad W = \text{fuerza } F, \quad g = \text{aceleración } L/T^2, \quad T = \text{tiempo } T$$

Existen 4 magnitudes físicas, 3 de ellas fundamentales, de donde  $(4 - 3) = \text{un número } \pi$ .

##### Paso 2

Escogidas  $s$ ,  $W$  y  $T$  como magnitudes físicas proporcionan las tres dimensiones fundamentales  $F$ ,  $L$  y  $T$

##### Paso 3

Como las magnitudes físicas de dimensiones distintas no pueden sumarse ni restarse, el número  $\pi$  se expresa en forma de producto, como sigue:

$$\pi_1 = (s^{x_1}) (W^{y_1}) (T^{z_1}) (g) \quad (1)$$

Aplicando la homogeneidad dimensional

$$F^0 L^0 T^0 = (L^{x_1}) (F^{y_1}) (T^{z_1}) (L T^{-2})$$

Igualando los exponentes de  $F$ ,  $L$  y  $T$ , respectivamente, se obtiene  $0 = y_1$ ,  $0 = x_1 + 1$ ,  $0 = z_1 - 2$ , de donde  $x_1 = -1$ ,  $y_1 = 0$ ,  $z_1 = 2$ . Sustituyendo en (1),

$$\pi_1 = s^{-1} W^0 T^2 g = \frac{W^0 T^2 g}{s}$$

Despejando  $s$  y poniendo  $1/\pi_1 = K$ , se obtiene  $s = K g T^2$ .

### 15. Resolver el Problema 6 aplicando el Teorema de Pi de Buckingham.

#### Solución:

El problema se establece matemáticamente así

$$f(P, w, Q, H) = 0$$

Las magnitudes físicas con sus dimensiones en el sistema  $F, L$  y  $T$  son

$$\begin{array}{ll} \text{Potencia } P = F L T^{-1} & \text{Caudal } Q = L^3 T^{-1} \\ \text{Peso específico } w = F L^{-3} & \text{Carga } H = L \end{array}$$

Existen 4 magnitudes físicas y de ellas 3 fundamentales, de donde  $(4 - 3) = 1$  grupo  $\pi$ .

Escogidas  $Q, w$  y  $H$  como magnitudes con exponentes desconocidos, el grupo  $\pi$  se establece como sigue:

$$\begin{array}{l} \circ \quad \pi_1 = (Q^{x_1})(w^{y_1})(H^{z_1})P \\ \quad \pi_1 = (L^{3x_1} T^{-x_1})(F^{y_1} L^{-3y_1})(L^{z_1})(F L T^{-1})P \end{array} \quad (1)$$

Igualando los exponentes de  $F, L$  y  $T$ , respectivamente, se obtiene  $0 = y_1 + 1, 0 = 3x_1 - 3y_1 + z_1 + 1, 0 = -x_1 - 1$ , de donde  $x_1 = -1, y_1 = -1, z_1 = -1$ . Sustituyendo en (1),

$$\pi_1 = Q^{-1} w^{-1} H^{-1} P = \frac{P}{w Q H} \quad \circ \quad P = K w Q H$$

### 16. Resolver el Problema 9, aplicando el Teorema de Pi de Buckingham.

#### Solución:

El problema puede establecerse así

$$\phi(F, \rho, \mu, L, V) = 0$$

Las magnitudes físicas y sus dimensiones en el sistema  $F, L$  y  $T$  son

$$\begin{array}{ll} \text{Fuerza } F = F & \text{Longitud } L = L \\ \text{Densidad } \rho = F T^2 L^{-4} & \text{Velocidad } V = L T^{-1} \\ \text{Viscosidad absoluta } \mu = F T L^{-2} & \end{array}$$

Existen 5 magnitudes físicas, de ellas 3 fundamentales, de donde  $(5 - 3) = 2$  números  $\pi$ .

Escogidas la longitud  $L$ , la velocidad  $V$  y la densidad  $\rho$  como 3 variables repetidas con exponentes desconocidos, se establecen los números  $\pi$  como sigue:

$$\pi_1 = (L^{a_1})(L^{b_1} T^{-b_1})(F^{c_1} T^{2c_1} L^{-4c_1})(F) \quad (1)$$

Igualando los exponentes de  $F, L$  y  $T$ , respectivamente, se obtiene  $0 = c_1 + 1, 0 = a_1 + b_1 - 4c_1, 0 = -b_1 + 2c_1$ , de donde  $c_1 = -1, b_1 = -2, a_1 = -2$ . Sustituyendo en (1),  $\pi_1 = F/L^2 V^2 \rho$ .

Para calcular el segundo número  $\pi$  se mantienen las tres primeras magnitudes físicas y se añade otra magnitud, en este caso la viscosidad absoluta  $\mu$ . (Véase Problema 13, Apartado 4.)

$$\pi_2 = (L^{a_2})(L^{b_2} T^{-b_2})(F^{c_2} T^{2c_2} L^{-4c_2})(F T L^{-2}) \quad (2)$$

Igualando los exponentes de  $F, L$  y  $T$ , respectivamente, se obtiene  $0 = c_2 + 1, 0 = a_2 + b_2 - 4c_2 - 2, 0 = -b_2 + 2c_2 + 1$ , de donde  $c_2 = -1, b_2 = -1, a_2 = -1$ . Por tanto,  $\pi_2 = \mu/LV\rho$ . Esta expresión puede ponerse en la forma  $\pi_2 = LV\rho/\mu$ , que es una forma del número de Reynolds.

La nueva relación, escrita en función de los grupos  $\pi_1$  y  $\pi_2$ , es

$$f_1\left(\frac{F}{L^2 V^2 \rho}, \frac{LV\rho}{\mu}\right) = 0$$

$$\circ \quad \text{Fuerza } F = (L^2 V^2 \rho) f_2\left(\frac{LV\rho}{\mu}\right)$$

que puede escribirse

$$F = (2K Re) \rho L^2 \frac{V^2}{2}$$

Sustituyendo  $L^2$  por un área, la ecuación puede establecerse finalmente en la forma  $F = C_D \rho A \frac{V^2}{2}$ . (Véase Capítulo 11.)

### 17. Resolver el Problema 11 mediante el Teorema de Pi de Buckingham.

#### Solución:

Matemáticamente, el problema puede escribirse en la forma

$$f(\Delta p, d, \mu, \rho, L, V, K) = 0$$

donde  $K$  es la rugosidad relativa o relación del tamaño de las irregularidades de la superficie  $\epsilon$  al diámetro  $d$  de la tubería. (Véase Capítulo 7.)

Las magnitudes físicas con sus dimensiones en el sistema  $F$ ,  $L$  y  $T$  son

|  |                                  |
|--|----------------------------------|
| Caída de presión $\Delta p = F L^{-2}$ | Longitud $L = L$                 |
| Diámetro $d = L$                       | Velocidad $V = L T^{-1}$         |
| Viscosidad absoluta $\mu = F T L^{-2}$ | Rugosidad relativa $K = L_1/L_2$ |
| Densidad $\rho = F T^{-2} L^{-4}$      |                                  |

Existen 7 magnitudes físicas, 3 de ellas dimensiones fundamentales, de donde  $(7 - 3) = 4$  números  $\pi$ . Escogidos el diámetro, la velocidad y la densidad como variables repetidas con exponentes desconocidos, los números  $\pi$  son

$$\begin{aligned}\pi_1 &= (L^{x_1}) (L^{y_1} T^{-y_1}) (F^{z_1} T^{2z_1} L^{-4z_1}) (F L^{-2}) \\ \pi_2 &= (L^{x_2}) (L^{y_2} T^{-y_2}) (F^{z_2} T^{2z_2} L^{-4z_2}) (F T L^{-2}) \\ \pi_3 &= (L^{x_3}) (L^{y_3} T^{-y_3}) (F^{z_3} T^{2z_3} L^{-4z_3}) (L) \\ \pi_4 &= K = L_1/L_2\end{aligned}$$

Calculando los exponentes término a término se llega a

$$\begin{aligned}\pi_1: \quad 0 &= z_1 + 1, \quad 0 = x_1 + y_1 - 4z_1 - 2, \quad 0 = -y_1 + 2z_1; \quad \text{luego } x_1 = 0, \quad y_1 = -2, \quad z_1 = -1. \\ \pi_2: \quad 0 &= z_2 + 1, \quad 0 = x_2 + y_2 - 4z_2 - 2, \quad 0 = -y_2 + 2z_2 + 1; \quad \text{luego } x_2 = -1, \quad y_2 = -1, \quad z_2 = -1. \\ \pi_3: \quad 0 &= z_3, \quad 0 = x_3 + y_3 - 4z_3 + 1, \quad 0 = -y_3 + 2z_3; \quad \text{luego } x_3 = -1, \quad y_3 = 0, \quad z_3 = 0.\end{aligned}$$

De donde los números  $\pi$  son

$$\begin{aligned}\pi_1 &= d^0 V^{-2} \rho^{-1} \Delta p = \frac{\Delta p}{\rho V^2} && \text{(número de Euler)} \\ \pi_2 &= \frac{\mu}{d V \rho} \quad 0 \quad \frac{d V \rho}{\mu} && \text{(número de Reynolds)} \\ \pi_3 &= d^{-1} V^0 \rho^0 L = \frac{L}{d} && \text{(como podía esperarse; véase Apartado b, Problema 13)} \\ \pi_4 &= L_1/L_2 = \frac{\epsilon}{d} && \text{(véase Capítulo 7)}\end{aligned}$$

La nueva relación puede escribirse ahora

$$f_1\left(\frac{\Delta p}{\rho V^2}, \frac{d V \rho}{\mu}, \frac{L}{d}, \frac{\epsilon}{d}\right) = 0$$

Despejando  $\Delta p$ ,

$$\Delta p = \frac{w}{g} V^2 f_2\left(R_e, \frac{L}{d}, \frac{\epsilon}{d}\right)$$

donde  $\rho = w/g$ . De aquí, la caída de presión en pérdida de altura sería

$$\frac{\Delta p}{w} = \frac{V^2}{2g} (2) \cdot f_2\left(R_e, \frac{L}{d}, \frac{\epsilon}{d}\right)$$

Si lo que se desea es obtener una expresión del tipo de la de Darcy, la experiencia y el análisis indican que la caída de presión es proporcional a la primera potencia de  $L/d$ ; por tanto,

$$\frac{\Delta p}{w} = \frac{V^2}{2g} \cdot \frac{L}{d} \cdot 2 \cdot f_s \left( R_{\varepsilon}, \frac{\varepsilon}{d} \right)$$

que puede ponerse en la forma

$$\frac{\Delta p}{w} = (\text{coeficiente}) f\left(\frac{L}{d}\right) \left(\frac{V^2}{2g}\right)$$

### Nota 1

Si el flujo fuera compresible habría que incluir otra magnitud física, el módulo volumétrico de elasticidad  $E$ , y el quinto grupo  $\pi$  conduciría a la relación adimensional  $\frac{E}{\rho V^2}$ . Este se escribe normalmente en la forma  $\frac{V}{\sqrt{E/\rho}}$ , que es el número de Mach.

### Nota 2

Si la gravedad influye en el problema general del flujo habría que incluir la fuerza de la gravedad como nueva magnitud física, y el sexto número  $\pi$  conduciría a la relación adimensional  $\frac{V^2}{g L}$ . Este grupo se llama número de Froude.

### Nota 3

Si en el problema general interviniera también la tensión superficial  $\sigma$  habría que tenerla en cuenta como nueva magnitud física, lo que conduciría a un séptimo grupo  $\pi$  adimensional. El número  $\pi$  tomaría la forma  $\frac{V^2 L \rho}{\sigma}$ , que es el número de Weber.

18. Cuando únicamente influyen la gravedad y la inercia, demostrar que, para modelo y prototipo, la relación de caudales  $Q$  es igual a la relación de longitudes elevada a cinco medios.

**Solución:**

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \frac{L_m^3/T_m}{L_p^3/T_p} = \frac{L_r^3}{T_r^3}$$

Hay que establecer la relación de tiempos para las condiciones que influyen en el flujo. Las expresiones para la gravedad y las fuerzas de inercia pueden escribirse como sigue

$$\text{Gravedad: } \frac{F_m}{F_p} = \frac{W_m}{W_p} = \frac{w_m}{w_p} \times \frac{L_m^3}{L_p^3} = w_r \frac{L_r^3}{T_r^3}$$

$$\text{Inercia: } \frac{F_m}{F_p} = \frac{M_m a_m}{M_p a_p} = \frac{\rho_m}{\rho_p} \times \frac{L_m^3}{L_p^3} \times \frac{L_r}{T_r^2} = \rho_r \frac{L_r^3}{T_r^2} \times \frac{L_r}{T_r^2}$$

Igualando las relaciones de fuerzas,

$$w_r \frac{L_r^3}{T_r^3} = \rho_r \frac{L_r^3}{T_r^3} \times \frac{L_r}{T_r^2}$$

de la que, despejando la relación de tiempos, se llega a

$$T_r^2 = L_r \times \frac{\rho_r}{w_r} = \frac{L_r}{g_r} \quad (1)$$

Como  $g$ , es igual a la unidad, la sustitución en la relación de caudales conduce a la expresión buscada

$$Q_r = \frac{Q_m}{Q_p} = \frac{L_r^3}{L_r^{1/2}} = L_r^{5/2} \quad (2)$$

19. Para las condiciones establecidas en el problema precedente obtener (a) la relación de velocidades y (b) la relación de presiones y la relación de fuerzas.

**Solución:**

- (a) Al dividir los dos miembros de la ecuación (1) del problema anterior por  $L_r^2$ , se obtiene



$$\frac{T_r^2}{L_r^2} = \frac{L_r}{L_r^2 g_r} \quad \text{o como} \quad V = \frac{L}{T}, \quad V_r^2 = L_r g_r$$

Pero el valor de  $g_r$  puede considerarse igual a la unidad. Esto significa que, para modelo y prototipo,  $V_r^2 = L_r$ , que puede llamarse la ley de modelos de Froude para la relación de velocidades.

$$(b) \text{ Relación de fuerzas para fuerzas de presión} = \frac{p_m L_m}{p_p L_p} = p_r L_r$$

$$\text{Relación de fuerzas para fuerzas de inercia} = \frac{\rho_r L_r^4}{T_r^2} = w_r L_r$$

$$\begin{aligned} \text{Igualando éstas, se obtiene} \\ p_r L_r^2 &= w_r L_r^3 \\ p_r &= w_r L_r \end{aligned} \quad (1)$$

Para los estudios sobre modelos en flujos con superficie libre, los números de Froude en modelo y prototipo han de ser iguales. También han de ser iguales los números de Euler en modelo y prototipo. Utilizando  $V_r^2 = L_r$ , la ecuación (1) puede ponerse en la forma

$$\begin{aligned} p_r &= w_r V_r^2 \\ y, \text{ como fuerza } F &= p A, \quad F_r = p_r L_r^2 = w_r L_r^3 \end{aligned} \quad (2)$$

## 20. Desarrollar la ley de modelos de Reynolds para las relaciones de tiempos y de velocidades de líquidos incompresibles.

### Solución:

Para configuraciones de flujos solo dependientes de las fuerzas de inercia y viscosas (siendo el resto de influencias despreciables) es necesario calcular estas fuerzas para modelo y prototipo.

$$\text{Inercia:} \quad \frac{F_m}{F_p} = \rho_r L_r^3 \times \frac{L_r}{T_r^2} \quad (\text{del problema precedente})$$

$$\begin{aligned} \text{Viscosidad:} \quad \frac{F_m}{F_p} &= \frac{\tau_m A_m}{\tau_p A_p} = \frac{\mu_m (dV/dy)_m A_m}{\mu_p (dV/dy)_p A_p} = \frac{\mu_m (L_m/T_m \times 1/L_m) L_m^2}{\mu_p (L_p/T_p \times 1/L_p) L_p^2} \\ &= \frac{\mu_m L_m^2/T_m}{\mu_p L_p^2/T_p} = \frac{\mu_r L_r^2}{T_r} \end{aligned}$$

$$\text{Igualando las dos relaciones de fuerzas, se obtiene } \rho_r \frac{L_r^4}{T_r^2} = \frac{\mu_r L_r^2}{T_r} \quad \text{de la cual} \quad T_r = \frac{\rho_r L_r^2}{\mu_r}$$

$$\text{Como } \nu = \frac{\mu}{\rho}, \text{ se puede poner} \quad T_r = \frac{L_r^2}{\nu_r} \quad (1)$$

$$\text{Relación de velocidades} \quad V_r = \frac{L_r}{T_r} = \frac{\nu_r}{L_r} \quad (2)$$

Escribiendo estas relaciones en función del modelo y prototipo a partir de (2), se obtiene

$$\frac{V_m}{V_p} = \frac{\nu_m}{\nu_p} \times \frac{L_p}{L_m}$$

Reuniendo términos para modelo y prototipo se llega a  $V_m L_m/\nu_m = V_p L_p/\nu_p$ , igualdad que el lector puede identificar como: Número de Reynolds para el modelo = número de Reynolds para el prototipo.

21. Un aceite de viscosidad cinemática  $4,70 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{seg}$  va a utilizarse en un prototipo en el que son fuerzas predominantes las debidas a la viscosidad y a la gravedad. También se desea experimentar sobre un modelo a escala de 1 : 5. ¿Qué valor debe tener la viscosidad del líquido del modelo para que tanto el número de Froude como el de Reynolds sean iguales en modelo y prototipo?

**Solución:**

Mediante las escalas de velocidades de las leyes de Froude y de Reynolds (véanse Problemas 19 y 20) se establece la igualdad

$$(L_r g_r)^{1/2} = v_r / L_r$$

$$\text{Ya que } g_r = 1, \quad L_r^{3/2} = v_r \quad v_r = (1/5)^{3/2} = 0,0894.$$

$$\text{Esto significa que } \frac{v_m}{v_p} = 0,0894 = \frac{v_m}{4,70 \times 10^{-5}} \text{ y, por tanto, } v_m = 4,20 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg.}$$

Mediante las escalas de tiempos, aceleraciones y caudales se llegaría a los mismos resultados. Por ejemplo, igualando la relación de tiempos (Problemas 18 y 20) se llega a

$$\frac{L_r^{1/2}}{g_r^{1/2}} = \frac{\rho_r L_r^2}{\mu_r} \quad \text{o, como } g_r = 1, \quad \frac{\mu_r}{\rho_r} = v_r = L_r^{3/2}, \text{ como antes.}$$

22. A través de una tubería de 20 cm de diámetro está fluyendo agua a  $15^\circ \text{C}$  a una velocidad de 4,0 m/seg. ¿A qué velocidad debe fluir un fuel-oil medio a  $32^\circ \text{C}$  por el interior de una tubería de 10 cm de diámetro para que los dos flujos sean dinámicamente semejantes?

**Solución:**

Como los flujos en ambas tuberías están sujetos únicamente a las fuerzas debidas a la viscosidad y a la inercia, el criterio de semejanza será la igualdad de los números de Reynolds. Otras propiedades del fluido que circula, tales como la elasticidad, la tensión superficial y las fuerzas gravitatorias, no afectarán a la configuración del flujo. Por tanto, para la semejanza dinámica,

Número de Reynolds para el agua = número de Reynolds para el aceite

$$\frac{V d}{\nu} = \frac{V' d'}{\nu'}$$

Sustituyendo los valores obtenidos de las viscosidades en la Tabla 2 del Apéndice,

$$\frac{4,0 \times 0,2}{1,13 \times 10^{-6}} = \frac{V' \times 0,1}{2,97 \times 10^{-6}}$$

y  $V' = 21,0 \text{ m/seg}$  para el aceite.

23. A través de una tubería de 60 cm de diámetro está circulando aire a  $20^\circ \text{C}$  a una velocidad media de 2,0 m/seg. ¿Cuál debe ser el diámetro de la tubería que al transportar agua a  $15^\circ \text{C}$  y a una velocidad de 1,22 m/seg dé lugar a un flujo dinámicamente semejante?

**Solución:**

$$\text{Igualando los dos números de Reynolds: } \frac{2,0 \times 0,6}{1,49 \times 10^{-5}} = \frac{1,22 \times d}{1,13 \times 10^{-6}}, \quad d = 0,075 \text{ m} = 7,5 \text{ cm}$$

24. Un modelo de submarino a escala 1 : 15 va a ser ensayado en un canal hidrodinámico de agua salada. Si el submarino se mueve a una velocidad de 12,0 mph (millas por hora), ¿a qué velocidad deberá ser arrastrado el modelo para que exista semejanza dinámica?

**Solución:**

$$\text{Igualando los números de Reynolds para modelo y prototipo: } \frac{12,0 \times L}{v} = \frac{V \times L/15}{v}, \quad V = 180 \text{ mph.}$$

25. Un modelo de avión a escala 1 : 80 es ensayado en una corriente de aire a 20° C y a una velocidad de 45 m/seg. (a) ¿A qué velocidad habrá de arrastrarse el modelo si está totalmente sumergido en agua a 27° C? (b) ¿Qué arrastre sobre el prototipo en el aire corresponderá a una resistencia sobre el modelo en el agua de 0,55 kg?

**Solución:**

$$(a) \text{ Igualando los números de Reynolds, } \frac{45 \times L}{1,49 \times 10^{-5}} = \frac{V \times L}{0,864 \times 10^{-6}} \quad \text{o} \quad V = 2,60 \text{ m/seg en el agua.}$$

- (b) Como  $p$  varía proporcionalmente a  $\rho V^2$ , igualando los números de Euler, se obtiene

$$\frac{\rho_m V_m^2}{\rho_p} = \frac{\rho_p V_p^2}{p_p} \quad \text{o} \quad \frac{p_m}{p_p} = \frac{\rho_m V_m^2}{\rho_p V_p^2}$$

Pero las fuerzas que actúan son (presión  $\times$  área), es decir,  $p L^2$ ; de aquí

$$\frac{F_m}{F_p} = \frac{p_m L_m^2}{p_p L_p^2} = \frac{\rho_m V_m^2 L_m^2}{\rho_p V_p^2 L_p^2}$$

$$F_r = \rho_r V_r^2 L_r^2 \quad [\text{ecuación (6), página 51}].$$

Para obtener la velocidad del prototipo en el aire se igualan los números de Reynolds, con lo que se obtiene

$$V_m L_m = \frac{V_p L_p}{V_{\text{aire}}} \quad \text{o} \quad \frac{45 \times L_p / 80}{V_{\text{aire}}} = \frac{V_p L_p}{V_{\text{aire}}} \quad \text{y} \quad V_p = 0,563 \text{ m/seg}$$

$$\text{Por tanto, } \frac{0,55}{F_p} = \left( \frac{102}{0,123} \right) \left( \frac{2,60}{0,563} \right)^2 \left( \frac{1}{80} \right)^2 \quad \text{y} \quad F_p = 0,200 \text{ kg}$$

26. Un modelo de torpedo es ensayado en un canal hidrodinámico a una velocidad de 24,0 m/seg. Si espera que el prototipo se mueva a una velocidad de 6,0 m/seg en agua a 15° C. (a) ¿A qué escala se ha construido el modelo? (b) ¿A qué velocidad se ensayará el modelo en un túnel aerodinámico si la presión es de 20 atmósferas y la temperatura constante de 27° C?

**Solución:**

- (a) Igualando los números de Reynolds para prototipo y modelo,  $\frac{6,0 \times L}{v} = \frac{24,0 \times L/x}{v}$  o bien  $x = 4$ . La escala geométrica del modelo es 1:4.

- (b) La viscosidad absoluta para el aire, de la Tabla 1(B), es  $1,88 \times 10^{-6}$  kg seg/m<sup>2</sup> y la densidad  $\rho = \frac{w}{g} = \frac{20 \times 1,033 \times 10^4}{9,8(29,3)(273 + 27)} = 2,410$  UTM/m<sup>3</sup> (o bien  $\rho = 20$  veces el valor de la Tabla 1(B) a 27° C = 20  $\times$  0,120 = 2,40). Por tanto,

$$\frac{6,0 \times L}{1,13 \times 10^{-6}} = \frac{V \times L/4}{1,88 \times 10^{-6} / 2,410} \quad \text{y} \quad V = 16,50 \text{ m/seg}$$

27. Una bomba centrífuga, girando a 1200 rpm, bombea un aceite lubricante medio a 15° C. Se va a ensayar un modelo de la bomba que utiliza aire a 20° C. Si el diámetro del modelo es 3 veces mayor que el del prototipo, ¿a qué velocidad debe girar el modelo?

**Solución:**

Utilizando como velocidades en los números de Reynolds las velocidades periféricas (que son iguales a radio por la velocidad angular en radianes/seg), se obtiene

$$\frac{(d/2) \omega_p (d)}{17,5 \times 10^{-5}} = \frac{(3d/2) \omega_m (3d)}{1,49 \times 10^{-5}}$$

De aquí,  $\omega_p = 106 \omega_m$  y velocidad de giro del modelo = 1200/106 = 11,3 rpm.

28. Un ala de avión de 90 cm de cuerda se ha de mover a 90 mph en el aire. En el túnel aerodinámico se va a ensayar un modelo de 7,50 cm de cuerda con una velocidad del aire de 108 mph. Para una temperatura del aire en ambos casos de 20° C, ¿cuál debe ser la presión en el túnel aerodinámico?

**Solución:**

Igualando los números de Reynolds, en modelo y prototipo, y utilizando las mismas unidades para las velocidades.

$$\frac{V_m L_m}{\nu_m} = \frac{V_p L_p}{\nu_p}, \quad \frac{108 \times 0,075}{\nu_{\text{túnel}}} = \frac{90 \times 0,90}{1,49 \times 10^{-5}}, \quad \nu_{\text{túnel}} = 1,49 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}$$

La presión que da lugar a esta viscosidad cinemática a 20° C puede calcularse recordando que la viscosidad absoluta no se ve afectada por los cambios de presión. La viscosidad cinemática es igual a la viscosidad absoluta dividida por la densidad. Pero la densidad aumenta con la presión (a temperatura constante); por tanto,

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad y \quad \frac{\nu_m}{\nu_p} = \frac{1,49 \times 10^{-5}}{1,49 \times 10^{-6}} = 10,0$$

De aquí, la densidad del aire en el túnel debe ser diez veces mayor que la normal (20° C) del aire y, por tanto, la presión del aire en el túnel habrá de ser de diez atmósferas.

29. Un barco cuyo casco tiene una longitud de 140 m ha de moverse a 7,50 m/seg. (a) Calcular el número de Froude  $N_F$ . (b) Para la semejanza dinámica, ¿a qué velocidad debe remolcarse en agua un modelo construido a una escala 1 : 30?

**Solución:**

$$(a) \quad N_F = \frac{V}{\sqrt{g L}} = \frac{7,50}{\sqrt{9,8 \times 140}} = 0,203$$

- (b) Cuando las configuraciones de los flujos, con contornos geoméricamente semejantes, se ven influenciadas por las fuerzas de inercia y las gravitatorias, el número de Froude es el grupo adimensional significativo en los estudios sobre modelo. Por tanto,

Número de Froude del prototipo = número de Froude del modelo

$$0 \quad \frac{V}{\sqrt{g L}} = \frac{V'}{\sqrt{g' L'}}$$

Como  $g = g'$  en todos los casos prácticos, puede escribirse

$$\frac{V}{\sqrt{L}} = \frac{V'}{\sqrt{L'}}, \quad \frac{7,50}{\sqrt{140}} = \frac{V'}{\sqrt{140/30}}, \quad V' = 1,37 \text{ m/seg en el modelo}$$

30. A través de una acequia de 60 cm de anchura se va a construir un modelo de aliviadero a escala 1 : 25. El prototipo tiene 12,5 m de altura y se espera una altura de carga máxima de 1,50 m. (a) ¿Qué altura y qué carga deben utilizarse en el modelo? (b) Si el caudal vertido sobre el modelo es de 20 l/seg con una carga de 6,0 cm, ¿qué caudal por metro de prototipo puede esperarse? (c) Si en el modelo aparece un resalto hidráulico de 2,50 cm, ¿qué altura tendrá el resalto en el prototipo? (d) Si la energía disipada en el resalto hidráulico del modelo es de 0,15 CV, ¿cuál será la energía disipada en el prototipo?

**Solución:**

$$(a) \quad \text{Como } \frac{\text{longitudes en modelo}}{\text{longitudes en prototipo}} = \frac{1}{25}, \quad \text{altura del modelo} = \frac{1}{25} \times 12,50 = 0,50 \text{ m} \quad y$$

$$\text{altura de carga sobre el modelo} = \frac{1}{25} \times 1,50 = 0,06 \text{ m} = 6 \text{ cm.}$$

- (b) Por predominar las fuerzas gravitatorias, del Problema 18,  $Q_r = L_r^{5/2}$ , y de aquí

$$Q_p = \frac{Q_m}{L_r^{5/2}} = 20 \times 10^{-3} (25 \times 25 \times 5) = 62,50 \text{ m}^3/\text{seg}$$

Este caudal puede esperarse en  $0,6 \times 25 = 15 \text{ m}$  de longitud del prototipo. Por tanto, caudal por metro de prototipo  $= 62,5/15 = 4,17 \text{ m}^3/\text{seg}$ .

$$(c) \quad \frac{h_m}{h_p} = L_r \quad \text{o} \quad h_p = \frac{h_m}{L_r} = \frac{2,5}{1/25} = 62,50 \text{ cm (altura del resalto)}$$

$$(d) \quad \text{Relación de potencias } P_r = (\text{kgm/seg})_r = \frac{F_r L_r}{T_r} = \frac{w_r L_r^3 L_r}{\sqrt{L_r} g_r T_r}. \text{ Pero } g_r = 1 \text{ y } w_r = 1. \text{ De aquí,}$$

$$\frac{P_m}{P_p} = L_r^{7/2} = \left(\frac{1}{25}\right)^{7/2} \quad \text{y} \quad P_p = P_m (25)^{7/2} = 0,15 (25)^{7/2} = 11.700 \text{ CV}$$

**31.** El modelo de un recipiente se vacía en 4 minutos al abrir una compuerta de tajadera. El modelo está construido a una escala 1 : 225. ¿Cuánto tiempo tardará en vaciarse el prototipo?

**Solución:**

Como la fuerza debida a la gravedad es la dominante, la relación de las  $Q$ , por el Problema 18, es igual a  $L_r^{5/2}$ .

Además,  $Q_r = \frac{Q_m}{Q_p} = \frac{L_m^3}{L_p^3} : \frac{T_m}{T_p}$ . Por tanto,  $L_r^{5/2} = L_r^3 \times \frac{T_p}{T_m}$  y  $T_p = T_m / L_r^{1/2} = 4(225)^{1/2} = 60$  minutos.

**32.** Un espigón rectangular en un río tiene 1,20 m de anchura por 3,60 m de longitud, siendo la profundidad media del agua de 2,70 m. Se construye un modelo a una escala de 1 : 16. Sobre el modelo se mantiene un flujo de una velocidad media de 0,75 m/seg y la fuerza que actúa sobre el modelo es de 400 g. (a) ¿Cuáles son los valores de la velocidad y de la fuerza sobre el prototipo? (b) Si delante del modelo se forma una ola estacionaria de 5,0 cm de altura, ¿cuál será la altura esperada de la ola que se forme en la tajamar del espigón? (c) ¿Cuál es el valor del coeficiente de arrastre o resistencia?

**Solución:**

(a) Como predominan las fuerzas debidas a la gravedad, del Problema 19 se obtiene

$$\frac{V_m}{V_p} = \sqrt{L_r} \quad \text{y} \quad V_p = \frac{0,75}{(1/16)^{1/2}} = 3,0 \text{ m/seg}$$

$$\text{Además,} \quad \frac{F_m}{F_p} = w_r L_r^3 \quad \text{y} \quad F_p = \frac{0,40}{1,0(1/16)^3} = 1640 \text{ kg}$$

$$(b) \quad \text{Como} \quad \frac{V_m}{V_p} = \sqrt{\frac{L_m}{L_p}}, \quad \sqrt{h_p} = \sqrt{0,05 \times \frac{3,00}{0,75}} \quad \text{y} \quad h_p = 0,90 \text{ m de altura de la ola.}$$

$$(c) \quad \text{Fuerza de arrastre} = C_D \rho A \frac{V^2}{2}, \quad 0,40 = C_D (102) \left( \frac{1,2}{16} \times \frac{2,7}{16} \right) \frac{2}{2} \quad \text{y} \quad C_D = 1,10.$$

Si se hubieran utilizado los valores del prototipo para estos cálculos, se habría obtenido lo siguiente:

$$1640 = C_D (102) (1,2 \times 2,7) \frac{(3,0)^2}{2} \quad \text{y} \quad C_D = 1,10, \text{ como era de esperar}$$

**33.** La resistencia medida en agua dulce, presentada a un modelo de barco de 2,50 m, moviéndose a una velocidad de 2,0 m/seg, fue de 4,40 kg. (a) ¿Cuál será la velocidad del prototipo de 40 m? (b) ¿Cuál será la fuerza necesaria para mover a esta velocidad el barco en agua salada?

**Solución:**

(a) Como predominan las fuerzas debidas a la gravedad, se obtiene

$$\frac{V_m}{V_p} = \sqrt{L_r} = \sqrt{8/128} \quad \text{y} \quad V_p = \frac{2,0}{(1/16)^{1/2}} = 8,0 \text{ m/seg}$$

$$(b) \quad \frac{F_m}{F_p} = w_r L_r^3 \quad \text{y} \quad F_p = \frac{4,40}{(1000/1025)(1/16)^3} = 18.470 \text{ kg}$$

Este último valor puede encontrarse mediante la fórmula que da la resistencia o fuerza de arrastre:

$$\text{Resistencia} = C_f \rho \frac{A}{2} V^2.$$

$$\text{Para el modelo,} \quad 4,40 = C_f \frac{1000}{2g} \frac{A}{(16)^2} (2,0)^2 \quad \text{y} \quad \frac{C_f A}{2g} = \frac{4,4(16)^2}{1000(2,0)^2} \quad (1)$$

$$\text{Para el prototipo,} \quad \text{fuerza} = C_f \frac{1025}{2g} (8,0)^2 \quad \text{y} \quad \frac{C_f A}{2g} = \frac{\text{fuerza}}{1025(8,0)^2} \quad (2)$$

Como el valor de  $C_f$  ha de ser el mismo para modelo y prototipo, al igualar (1) y (2) se obtiene

$$\frac{4,40(16)^2}{1000(2,0)^2} = \frac{\text{fuerza}}{1025(8,0)^2} \quad \text{de la cual} \quad \text{fuerza} = 18.470 \text{ kg, como antes}$$

34. (a) Calcular la escala geométrica del modelo cuando sea necesario tener en cuenta las fuerzas viscosas y gravitatorias para asegurar la semejanza. (b) ¿Cuál será la escala geométrica del modelo si el aceite empleado en el ensayo sobre modelo tiene una viscosidad cinemática de  $10 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{seg}$  y el líquido en el prototipo tiene una viscosidad de  $80 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{seg}$ ? (c) ¿Cuáles serán las relaciones de velocidades y caudales para estos líquidos si la escala geométrica modelo-prototipo es 1 : 4?

**Solución:**

- (a) En esta situación deben satisfacerse simultáneamente las igualdades de los números de Reynolds y de Froude. Se igualarán las relaciones de velocidades para cada una de las leyes de modelos. Mediante los resultados obtenidos en los Problemas 19 y 20,

Número de Reynolds  $V_r =$  número de Froude  $V_r$ ,

$$(v/L)_r = \sqrt{L_r g_r}$$

Como  $g_r = 1$ , se obtiene  $L_r = v_r^{2/3}$ .

- (b) Utilizando la relación de longitudes anterior,  $L_r = \left(\frac{10 \times 10^{-5}}{80 \times 10^{-5}}\right)^{2/3} = \frac{1}{4}$ . La escala del modelo es 1:4.

- (c) Mediante la ley de modelos de Froude (véanse Problemas 18 y 19),

$$V_r = \sqrt{L_r g_r} = \sqrt{L_r} = \sqrt{\frac{1}{4}} = \frac{1}{2} \quad \text{y} \quad Q_r = L_r^{5/2} = \left(\frac{1}{4}\right)^{5/2} = \frac{1}{32}$$

O mediante la ley de modelos de Reynolds (véase Problema 20),

$$V_r = \frac{v_r}{L_r} = \frac{10/80}{1/4} = \frac{1}{2} \quad \text{y} \quad Q_r = A_r V_r = L_r^2 \times \frac{v_r}{L_r} = L_r v_r = \frac{1}{4} \left(\frac{10}{80}\right) = \frac{1}{32}$$

## Problemas propuestos

35. Comprobar dimensionalmente la expresión  $\tau = \mu (dV/dy)$ .
36. Demostrar mediante los métodos del análisis dimensional que la energía cinética de un cuerpo es igual a  $K M V^2$ .
37. Mediante los métodos del análisis dimensional probar que la fuerza centrífuga viene dada por  $K M V^2/r$ .
38. Un cuerpo cae libremente una distancia  $s$  partiendo del reposo. Desarrollar una ecuación para la velocidad.  
Sol.  $V = K \sqrt{s g}$
39. Un cuerpo cae libremente durante un tiempo  $T$  partiendo del reposo. Desarrollar una ecuación para la velocidad.  
Sol.  $V = K g T$
40. Desarrollar una expresión que dé la frecuencia de un péndulo simple, suponiendo que es función de la longitud  $y$  de la masa del péndulo  $y$  de la aceleración de la gravedad.  
Sol. Frecuencia  $= K \sqrt{g/L}$
41. Suponiendo que el caudal  $Q$  sobre un vertedero rectangular varía directamente con la longitud  $L$  y es función de la altura de carga total  $H$  y de la aceleración de la gravedad  $g$ , establecer la fórmula del vertedero.  
Sol.  $Q = K L H^{3/2} g^{1/2}$
42. Establecer la fórmula que da la distancia recorrida  $s$  por un cuerpo que cae libremente, suponiendo que dicha distancia depende de la velocidad inicial  $V$ , el tiempo  $T$  y la aceleración de la gravedad  $g$ .  
Sol.  $s = K V T (g T/V)^b$
43. Establecer la expresión del número de Froude al ser éste función de la velocidad  $V$ , la aceleración de la gravedad  $g$  y de la longitud  $L$ .  
Sol.  $N_F = K (V^2/L g)^{-c}$
44. Establecer la expresión del número de Weber si es función de la velocidad  $V$ , la densidad  $\rho$ , de la longitud  $L$  y de la tensión superficial  $\sigma$ .  
Sol.  $N_W = K (\rho L V^2/\sigma)^{-d}$
45. Establecer un número adimensional que sea función de la aceleración de la gravedad  $g$ , la tensión superficial  $\sigma$ , la viscosidad absoluta  $\mu$  y la densidad  $\rho$ .  
Sol. Número  $= K (\sigma^3 \rho / g \mu^4)^d$
46. Suponiendo que la fuerza de arrastre o resistencia de un barco es función de la viscosidad absoluta  $\mu$  y de la densidad  $\rho$  del fluido, de la velocidad  $V$ , la aceleración de la gravedad  $g$  y del tamaño (longitud  $L$ ) del barco, establecer la fórmula que da la resistencia.  
Sol. Fuerza  $= K (R_E^{-a} N_F^{-d} \rho V^2 L^2)$
47. Resolver el Problema 9 incluyendo los efectos de la compresibilidad mediante la magnitud *celeridad*  $c$ , velocidad de propagación del sonido.  
Sol. Fuerza  $= K' R_E^{-b} N_M^{-e} \rho A V^2/2$
48. Demostrar que, para orificios geoméricamente semejantes, la relación de velocidades es esencialmente igual a la raíz cuadrada de la relación de alturas de carga.
49. Demostrar que las relaciones de tiempos y de velocidades, cuando la magnitud predominante es la tensión superficial, vienen dadas por
 
$$T_r = \sqrt{L_r^3 \times \frac{\rho_r}{\sigma_r}} \quad y \quad V_r = \sqrt{\frac{\sigma_r}{L_r \rho_r}} \quad \text{respectivamente}$$
50. Demostrar que las relaciones de tiempos y velocidades, cuando los efectos predominantes son los elásticos, vienen dadas por
 
$$T_r = \frac{L_r}{\sqrt{E_r \rho_r}} \quad y \quad V_r = \sqrt{\frac{E_r}{\rho_r}} \quad \text{respectivamente}$$
51. El modelo de un aliviadero se construye a una escala 1:36. Si en el modelo la velocidad y caudal desaguado son, respectivamente, 0,40 m/seg y 62 l/seg. ¿cuáles son los valores correspondientes en el prototipo?  
Sol. 2,40 m/seg, 482 m<sup>3</sup>/seg
52. ¿A qué velocidad debe ensayarse en un túnel aerodinámico un modelo de ala de avión de 15 cm de cuerda para que el número de Reynolds sea el mismo que en el prototipo de 90 cm de cuerda y que se mueva a una velocidad de 150 km/h? En el túnel el aire está a la presión atmosférica.  
Sol. 900 km/h
53. A través de una tubería de 15 cm de diámetro fluye un aceite ( $\nu = 5,65 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}$ ) a una velocidad de 4 m/seg. ¿A qué velocidad debe circular agua a 15° C a través de una tubería de 30 cm de diámetro para que los números de Reynolds sean iguales?  
Sol. 0,40 m/seg

**54A**  $15^{\circ}\text{C}$  fluye gasolina a  $4\text{ m/seg}$  por una tubería de  $10\text{ cm}$ . ¿Qué diámetro debe tener una tubería que transporta agua a  $15^{\circ}\text{C}$  a una velocidad de  $2\text{ m/seg}$  para que los números de Reynolds sean los mismos?  
*Sol.*  $33,3\text{ cm}$

**55** Agua a  $15^{\circ}\text{C}$  fluye a  $4\text{ m/seg}$  a través de una tubería de  $15\text{ cm}$ . Para que exista semejanza dinámica, (a) ¿a qué velocidad debe fluir un fuel-oil medio a  $27^{\circ}\text{C}$  por una tubería de  $30\text{ cm}$ ? (b) ¿Qué diámetro de tubería se utilizaría si la velocidad del fuel-oil fuera de  $20\text{ m/seg}$ ?  
*Sol.*  $5,24\text{ m/seg}$ ,  $d = 7,86\text{ cm}$

**56** Un modelo es ensayado en atmósfera de aire normal a  $20^{\circ}\text{C}$  y a una velocidad de  $30,0\text{ m/seg}$ . ¿A qué velocidad debe ensayarse sumergido totalmente en el agua a  $15^{\circ}\text{C}$  de un canal hidrodinámico para que se satisfagan las condiciones de semejanza dinámica?  
*Sol.*  $2,28\text{ m/seg}$

**57** Un navío de superficie de  $155\text{ m}$  de longitud ha de moverse a  $7\text{ m/seg}$ . ¿A qué velocidad ha de ensayarse un modelo geoméricamente semejante de  $2,50\text{ m}$  de longitud?  
*Sol.*  $0,89\text{ m/seg}$

**58** ¿Qué fuerza por metro de longitud se ejercerá sobre un muro de contención del agua de mar si un modelo a escala  $1:36$  de una longitud de  $1\text{ m}$  experimenta una fuerza de las olas de  $12\text{ kg}$ ?  
*Sol.*  $15,550\text{ kg/m}$

**59** Un cuerpo anclado está sumergido en agua dulce a  $15^{\circ}\text{C}$ , que fluye a una velocidad de  $2,50\text{ m/seg}$ . La resistencia medida sobre un modelo a escala  $1:5$  en un túnel aerodinámico en condiciones normales es de  $2\text{ kg}$ . ¿Qué fuerza actúa sobre el prototipo si se dan las condiciones de la semejanza dinámica?  
*Sol.*  $9,60\text{ kg}$

**60** Determinar las expresiones de las relaciones o escalas de velocidades y pérdidas de carga entre modelo y prototipo para un flujo en que las fuerzas dominantes son las viscosas y las debidas a la presión.

$$\text{Sol. } V_r = p_r L_r/\mu_r \text{ y } \text{Perd. } H_r = V_r \mu_r/u_r L_r$$

**61** Obtener una expresión que dé el coeficiente de fricción  $f$  si se sabe que depende del diámetro de la tubería  $d$ , de la velocidad media  $V$ , de la densidad del fluido  $\rho$ , de la viscosidad del fluido  $\mu$  y de la rugosidad absoluta de la tubería  $\epsilon$ . Utilizar el teorema de Pi de Buckingham.

$$\text{Sol. } f = \phi(R_E, \epsilon/d)$$



## Fundamentos del flujo de fluidos

### INTRODUCCION

Del Capítulo 1 al 4 se han considerado los fluidos en reposo y la única propiedad significativa el peso del fluido. En este capítulo se expondrán conceptos adicionales, requeridos para el estudio de movimiento de los fluidos. El flujo de fluidos es complejo y no siempre puede ser estudiado de forma exacta mediante el análisis matemático. Contrariamente a lo que sucede con los sólidos, las partículas de un fluido en movimiento pueden tener diferentes velocidades y estar sujetas a distintas aceleraciones. Tres principios fundamentales que se aplican al flujo de fluidos son:

- (a) el principio de conservación de la masa, a partir del cual se establece la ecuación de continuidad,
- (b) el principio de la energía cinética, a partir del cual se deducen ciertas ecuaciones aplicables al flujo, y
- (c) el principio de la cantidad de movimiento, a partir del cual se deducen ecuaciones para calcular las fuerzas dinámicas ejercidas por los fluidos en movimiento (véanse Capítulos 11 y 12).

### FLUJO DE FLUIDOS

El flujo de los fluidos puede ser permanente o no permanente; uniforme o no uniforme; laminar o turbulento (Capítulo 7); unidimensional, bidimensional o tridimensional, y rotacional o irrotacional.

Verdaderamente, el flujo unidimensional de un fluido incompresible tiene lugar cuando el módulo de la velocidad y sentido de la velocidad en todos los puntos son idénticos. No obstante, el análisis del flujo unidimensional es aceptable cuando al tomar como única dimensión espacial, de la que dependen todas las características, la línea de corriente central del flujo pueden considerarse como despreciables las variaciones de las velocidades y aceleraciones en dirección normal a dicha línea de corriente. En tales casos, se consideran como representativas del flujo completo los valores medios de la velocidad, la presión y la elevación, despreciando las variaciones menores. Por ejemplo, el flujo en tuberías se analiza mediante los principios del flujo unidimensional, a pesar de que la geometría es tridimensional y la velocidad varía en las secciones rectas de la tubería.

Un flujo bidimensional tiene lugar cuando las partículas fluidas se mueven en planos o en superficies paralelas de forma que la configuración de las líneas de corriente es idéntica en cada plano.

Para un fluido ideal en que no existen tensiones cortantes no pueden transmitirse pares y no tienen lugar movimientos rotacionales de las partículas fluidas alrededor de su propio centro de gravedad. Tales flujos ideales, que admiten una representación muy intuitiva mediante la red de corriente, se llaman flujos irrotacionales.

En el Capítulo 4, los líquidos en depósitos que están girando constituyen un ejemplo de flujo rotacional en los que la velocidad de cada partícula varía en proporción directa a la distancia del centro de rotación.

## FLUJO PERMANENTE

El flujo permanente tiene lugar cuando, en un punto cualquiera, la velocidad de las sucesivas partículas que ocupan ese punto en los sucesivos instantes es la misma. Por tanto, la velocidad es constante respecto del tiempo o bien  $\partial V/\partial t = 0$ , pero puede variar de un punto a otro, es decir, ser variable respecto de las coordenadas espaciales. Este supuesto da por sentado que las otras variables o magnitudes del fluido y del flujo no varían con el tiempo o  $\partial p/\partial t = 0$ ,  $\partial \rho/\partial t = 0$ ,  $\partial Q/\partial t = 0$ , etc. La mayoría de los problemas técnicos prácticos implican condiciones permanentes del flujo. Por ejemplo, el transporte de líquidos bajo condiciones constantes de altura de carga o el vaciado de depósitos por orificios, bajo altura de carga constante, ilustran flujos permanentes. Estos flujos pueden ser uniformes o no uniformes.

La complejidad de los flujos no permanentes hacen que su estudio caiga fuera del propósito de un texto de introducción a la mecánica de los fluidos. Un flujo es no permanente cuando las condiciones en un punto cualquiera del fluido varían con el tiempo o bien  $\partial V/\partial t \neq 0$ . El Problema 7 da a conocer una ecuación general para el flujo no permanente y en el Capítulo 9 se presentarán unos pocos problemas sencillos, en los cuales la altura de carga y el caudal varían con el tiempo.

## FLUJO UNIFORME

El flujo uniforme tiene lugar cuando el módulo, la dirección y el sentido de la velocidad no varían de un punto a otro del fluido, es decir,  $\partial V/\partial s = 0$ . Este supuesto implica que las otras magnitudes físicas del fluido no varían con las coordenadas espaciales o bien  $\partial y/\partial s = 0$ ,  $\partial \rho/\partial s = 0$ ,  $\partial p/\partial s = 0$ , etc. El flujo de líquidos bajo presión a través de tuberías de diámetro constante y gran longitud es uniforme tanto si el régimen es permanente como si es no permanente.

El flujo es no uniforme cuando la velocidad, la profundidad, la presión, etc., varían de un punto a otro en la región del flujo, es decir,  $\partial V/\partial s \neq 0$ , etc. (Véase Capítulo 10.)

## LÍNEAS DE CORRIENTE

Las líneas de corriente son curvas imaginarias dibujadas a través de un fluido en movimiento y que indican la dirección de éste en los diversos puntos del flujo fluido. La tangente en un punto de la curva representa la dirección instantánea de la velocidad de las partículas fluidas en dicho punto. Las tangentes a las líneas de corriente pueden representar de esta forma la dirección media de la velocidad. Como la componente de la velocidad normal a la línea de corriente es nula, queda claro que no existe en ninguno de sus puntos flujo perpendicular a la línea de corriente.

## TUBOS DE CORRIENTE

Un tubo de corriente está constituido por una región parcial del flujo fluido delimitada por una familia de líneas de corriente, que lo confinan. Si la sección recta del tubo de corriente es suficientemente pequeña, la velocidad en el punto medio de una sección cualquiera puede considerarse como la velocidad media en dicha sección. El concepto de tubo de corriente se utilizará para deducir la ecuación de continuidad en el caso de fluido incompresible, o régimen permanente y unidimensional (Problema 1).

## ECUACION DE CONTINUIDAD

La ecuación de continuidad es una consecuencia del principio de conservación de la masa. Para un flujo permanente, la masa de fluido que atraviesa cualquier sección de una corriente de fluido, por unidad de tiempo, es constante. Esta puede calcularse como sigue

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 = \text{constante} \quad (1)$$

$$w_1 A_1 V_1 = w_2 A_2 V_2 \quad (\text{en kg/seg}) \quad (2)$$

Para fluidos *incompresibles* y para todos los casos prácticos en que  $w_1 = w_2$ , la ecuación se transforma en

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 = \text{constante} \quad (\text{en m}^3/\text{seg}) \quad (3')$$

donde  $A_1$  y  $V_1$  son, respectivamente, el área de la sección recta en  $\text{m}^2$  y la velocidad media de la corriente en  $\text{m}/\text{seg}$  en la sección 1, con significado análogo en la sección 2. (Véase Problema 1.) El caudal se mide normalmente en  $\text{m}^3/\text{seg}$  o bien en  $1/\text{seg}$ . En los Estados Unidos de Norteamérica en el abastecimiento de ciudades se emplea frecuentemente como unidad el millón de galones por día (mgd).

La ecuación de continuidad para un flujo permanente incompresible bidimensional es

$$A_n V_1 = A_{n_2} V_2 = A_{n_3} V_3 = \text{constante} \quad (4)$$

donde las magnitudes  $A_n$  representan las áreas normales a los respectivos vectores velocidad (véanse Problemas 10 y 11).

La ecuación de continuidad para flujos tridimensionales se deducirá en el Problema 7, para régimen permanente y no permanente. Para régimen permanente se reducirá la ecuación general para flujos uni y bidimensionales.

## RED DE CORRIENTE

Las redes de corriente se dibujan para representar la configuración del flujo en casos de flujos bidimensionales y en algunos casos también en tridimensionales. La red de corriente está formada por (a) una familia de líneas de corriente espaciadas de tal forma que el caudal  $q$  es el mismo entre cada dos pares de líneas y (b) otra familia de curvas ortogonales a las líneas de corriente, y espaciadas de tal forma que la separación entre ellas es igual a la separación entre las líneas de corriente adyacentes. Para describir completamente un flujo, con condiciones de contorno dadas, se requiere un número infinito de líneas de corriente. No obstante, el número de líneas de corriente empleadas prácticamente es el mínimo necesario para obtener la precisión deseada.

Aunque la técnica del trazado de la red de corriente se sale del propósito de un texto de introducción, el significado de dicha red de corriente sí es importante (véanse Problemas 13 y 14). Cuando se ha obtenido la red de corriente para una forma de los contornos que limitan el flujo, dicha red puede utilizarse para todos los flujos irrotacionales en tanto que los contornos sean geométricamente semejantes.

## ECUACION DE LA ENERGIA

Se obtiene la ecuación de energía al aplicar al flujo fluido el principio de conservación de la energía. La energía que posee un fluido en movimiento está integrada por la energía interna y las energías debidas a la presión, a la velocidad y a su posición en el espacio. En la dirección del flujo, el principio de la energía se traduce en la siguiente ecuación, al hacer el balance de la misma:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Energía en la} & & \text{Energía} & - & \text{Energía} & & \text{Energía en la} \\ \text{sección 1} & + & \text{añadida} & - & \text{perdida} & = & \text{sección 2} \end{array}$$

Esta ecuación, en los flujos permanentes de fluidos incompresibles con variaciones en su energía interna es despreciable, se reduce a

$$\left( \frac{p_1}{w} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 \right) + H_A - H_L - H_E = \left( \frac{p_2}{w} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \right) \quad (5')$$

La ecuación anterior se conoce con el nombre de *teorema de Bernoulli*. En el Problema 20 se dará una demostración de la ecuación (5) y las modificaciones para adaptarla al caso de fluidos compresibles.

Las unidades de cada término son  $\text{kgm/kg}$  de fluido o bien metros de fluido. Prácticamente, todos los problemas que entrañan flujos de líquidos se resuelven básicamente con esta ecuación. El flujo de gases, en muchos casos, va acompañado de transferencia de calor y se necesita la aplicación de los principios de la termodinámica, lo que se sale fuera del propósito de este libro.

## ALTURA DE VELOCIDAD

La altura de velocidad representa la energía cinética por unidad de peso que existe en un punto en particular. Si la velocidad en una sección recta fuera uniforme, la altura de velocidad calculada con esta velocidad uniforme (o velocidad media) daría la energía cinética correcta por unidad de peso del fluido. Pero, en general, la distribución de velocidades no es uniforme. La energía cinética verdadera se determina por integración de las energías cinéticas diferenciales de una a otra línea de corriente (véase Problema 16). El factor de corrección  $\alpha$  de la energía cinética, por el que hay que multiplicar el término  $V_{av}^2/2g$  viene dado por la expresión

$$\alpha = \frac{1}{A} \int_A \left(\frac{v}{V}\right)^3 dA \quad (6)$$

donde

$V$  = velocidad media en la sección recta

$v$  = velocidad en un punto genérico de la sección recta

$A$  = área de la sección recta.

Teóricamente puede verse que  $\alpha = 1,0$  para una distribución uniforme de velocidades,  $\alpha = 1,02$  a 1,15 para flujos turbulentos y  $\alpha = 2,00$  para flujo laminar. En la mayoría de los cálculos en la mecánica de fluidos se toma  $\alpha$  igual a 1,0, lo que no introduce serios errores en los resultados ya que la altura de velocidad representa, por lo general, un pequeño porcentaje de la altura total (energía).

## APLICACION DEL TEOREMA DE BERNOULLI

La aplicación del teorema de Bernoulli debe hacerse de forma racional y sistemática. El procedimiento sugerido es el siguiente:

- (1) Dibujar un esquema del sistema, seleccionando y marcando cada una de las secciones rectas bajo consideración.
- (2) Aplicar la ecuación de Bernoulli en la dirección del flujo. Seleccionar el plano de referencia para cada una de las ecuaciones escritas. Se escoge para esto el punto de menor elevación para que no existan signos negativos, reduciendo así el número de errores.
- (3) Calcular la energía aguas arriba en la sección 1. La energía se mide en  $\text{kgm/kg}$  que se reducen en definitiva a metros de fluido. En los líquidos, la altura de presión puede expresarse en unidades manométricas o absolutas, manteniendo las mismas unidades para la altura de presión en la sección 2. Para los líquidos resulta más sencillo utilizar unidades manométricas, por lo que se usarán a lo largo de todo el libro. Deben utilizarse alturas de presión absoluta cuando no es constante el peso específico  $w$ . Como en la ecuación de continuidad,  $V_1$  es la velocidad media en la sección, sin apreciable pérdida de precisión.
- (4) Añadir, en metros de fluido, toda energía adicionada al fluido mediante cualquier dispositivo mecánico, tal como bombas.
- (5) Restar, en metros de fluido, cualquier energía perdida durante el flujo.
- (6) Restar, en metros de fluido, cualquier energía extraída mediante dispositivos mecánicos, tal como turbinas.
- (7) Igualar la anterior suma algebraica a la suma de las alturas de presión, de velocidad y topográfica o elevación en la sección 2.
- (8) Si las dos alturas de velocidad son desconocidas, relacionarlas mediante la ecuación de continuidad.

## LINEA DE ENERGIA O DE ALTURAS TOTALES

La línea de alturas totales es la representación gráfica de la energía de cada sección. Para cada visión representativa puede representarse, respecto de un plano de referencia, la energía total (como  $V$  lineal en metros de fluido) y la línea obtenida de esta forma es de gran ayuda en muchos problemas de flujos. La línea de energías totales tiene una pendiente decreciente (cae) en el sentido del flujo, excepto en las secciones donde se añade energía mediante dispositivos mecánicos.

## LINEA DE ALTURAS PIEZOMETRICAS

La línea de alturas piezométricas está situada por debajo de la línea de alturas totales en una cantidad igual a la altura de velocidad en la sección correspondiente. Las dos líneas son paralelas para todos los tramos en que las secciones rectas tienen la misma área. La ordenada entre el eje de la corriente y la línea de alturas piezométricas es igual a la altura de presión en la sección en cuestión.

## POTENCIA

La potencia se calcula multiplicando el caudal en peso, kg/seg, ( $wQ$ ) por la energía  $H$  en kgm/kg. Así resulta la ecuación

$$\begin{aligned} \text{Potencia } P &= w Q H = \text{kg/m}^3 \times \text{m}^3/\text{seg} \times \text{kgm/kg} = \text{kgm/seg} \\ \text{Potencia en CV} &= w Q H/75. \end{aligned}$$

## Problemas resueltos

1. Deducir la ecuación de continuidad para un flujo permanente en el caso (a) de un fluido compresible y (b) de un fluido incompresible.

### Solución:

(a) Se considera un flujo a través de un tubo de corriente, siendo las secciones 1 y 2 normales a las líneas de corriente que forman el tubo. Para un valor de la densidad  $\rho_1$  y una velocidad normal  $V_1$ , el caudal en masa por unidad de tiempo que atraviesa la sección 1 es  $\rho_1 V_1 dA_1$ , ya que  $V_1 dA_1$  es el volumen por unidad de tiempo. Análogamente, el caudal en masa que atraviesa la sección 2 es  $\rho_2 V_2 dA_2$ . Como en un flujo permanente la masa no puede variar con el tiempo, y como no hay paso de fluido a través de la superficie que contornea el tubo de corriente, el caudal en masa a través del tubo de corriente es constante. Por tanto,

$$\rho_1 V_1 dA_1 = \rho_2 V_2 dA_2$$

Las densidades  $\rho_1$  y  $\rho_2$  se mantienen constantes en cada sección genérica  $dA$ , y las velocidades  $V_1$  y  $V_2$  presentan las velocidades del fluido en el tubo de corriente en las secciones 1 y 2, respectivamente. De aquí

$$\rho_1 V_1 \int_{A_1} dA_1 = \rho_2 V_2 \int_{A_2} dA_2$$

Integrando

$$\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \quad \text{o} \quad w_1 V_1 A_1 = w_2 V_2 A_2$$

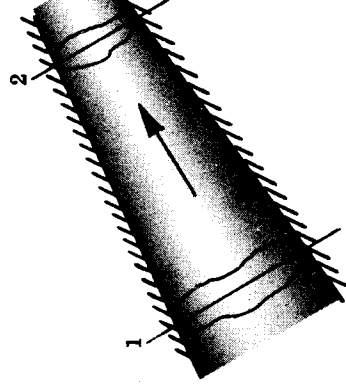


Fig. 6-1

- (b) Para fluidos incompresibles (y para algunos casos de flujos compresibles) la densidad es constante, es decir,  $\rho_1 = \rho_2$ . Por tanto,

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 = \text{constante} \quad (\text{en m}^3/\text{seg}) \quad (C)$$

Así, el caudal es constante a través de un haz de tubos de corriente. En muchos casos de flujos de fluidos pueden utilizarse en las ecuaciones de continuidad ( $B$ ) y ( $C$ ) las velocidades medias en la sección transversal.

2. Por una tubería de 30 cm de diámetro circulan 1800 l/min, reduciéndose después el diámetro de la tubería a 15 cm. Calcular las velocidades medias en ambas tuberías.

**Solución:**

$$Q \text{ en m}^3/\text{seg} = \frac{1800}{60} \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{seg} = 0,030 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$V_{30} = \frac{Q \text{ en m}^3/\text{seg}}{A \text{ en m}^2} = \frac{0,030}{\frac{1}{4}\pi(0,30)^2} = 0,43 \text{ m/seg} \quad \text{y} \quad V_{15} = \frac{0,030}{\frac{1}{4}\pi(0,15)^2} = 1,70 \text{ m/seg}$$

3. Si la velocidad en una tubería de 30 cm es de 0,50 m/seg, ¿cuál será la velocidad en el chorro de 7,5 cm de diámetro que sale por una boquilla unida al extremo de la tubería?

**Solución:**

$$Q = A_{30} V_{30} = A_{7,5} V_{7,5} \text{ o bien como las áreas son proporcionales al cuadrado de los diámetros } (30)^2 V_{30} = (7,5)^2 V_{7,5}. \text{ Por tanto, } V_{7,5} = (30/7,5)^2 V_{30} = 16 \times 0,50 = 8,0 \text{ m/seg.}$$

4. A través de una tubería de 15 cm de diámetro circula aire a una presión manométrica de 2,10 kg/cm<sup>2</sup> y una temperatura de 38° C. Si la presión barométrica es de 1,030 kg/cm<sup>2</sup> y la velocidad de 3,20 m/seg, ¿cuál es el caudal en peso que está fluyendo?

**Solución:**

En la ley de los gases hay que emplear unidades absolutas tanto en la temperatura como en la presión (kg/m<sup>2</sup>). Por tanto,

$$w_{\text{aire}} = \frac{p}{RT} = \frac{(2,10 + 1,03) \times 10^4}{29,3(38 + 273)} = 3,43 \text{ kg/m}^3$$

donde  $R = 29,3$ , constante de los gases para el aire, se ha obtenido de la Tabla 1 del Apéndice.

$$W \text{ en kg/seg} = wQ = wA_{15}V_{15} = 3,43 \text{ kg/m}^3 \times \frac{1}{4}\pi(0,15)^2 \text{ m}^2 \times 3,20 \text{ m/seg} = 0,194 \text{ kg/seg}$$

5. Por la sección  $A$  de una tubería de 7,5 cm de diámetro circula anhídrido carbónico a una velocidad de 4,50 m/seg. La presión en  $A$  es de 2,10 kg/cm<sup>2</sup> y la temperatura de 21° C. Aguas abajo en el punto  $B$  la presión es de 1,40 kg/cm<sup>2</sup> y la temperatura de 32° C. Para una lectura barométrica de 1,030 kg/cm<sup>2</sup>, calcular la velocidad en  $B$  y comparar los caudales volumétricos en  $A$  y  $B$ . El valor de  $R$  para el anhídrido carbónico es de 19,30, obtenido de la Tabla 1 del Apéndice.

**Solución:**

$$w_A = \frac{p_A}{RT} = \frac{3,13 \times 10^4}{19,3 \times 294} = 5,52 \text{ kg/m}^3, \quad w_B = \frac{2,43 \times 10^4}{19,3 \times 305} = 4,13 \text{ kg/m}^3$$

(a)  $W$  en kg/seg =  $w_A A_A V_A = w_B A_B V_B$ . Pero como  $A_A = A_B$ , se tiene

$$w_A V_A = w_B V_B = 5,52 \times 4,50 = 4,13 V_B \quad \text{y} \quad V_B = 6,0 \text{ m/seg}$$

(b) El caudal en peso es constante, pero el caudal en volumen variará por diferir el peso específico.

$$Q_A = A_A V_A = \frac{1}{4}\pi(0,075)^2 \times 4,50 = 19,9 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{seg}, \quad Q_B = A_B V_B = \frac{1}{4}\pi(0,075)^2 \times 6,00 = 26,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{seg}$$

6. ¿Qué diámetro máximo de tubería será necesario para transportar 0,230 kg/seg de aire a una velocidad máxima de 5,50 m/seg? La temperatura del aire es de 27°C y la presión absoluta de 2,40 kg/cm<sup>2</sup>.

**Solución:**

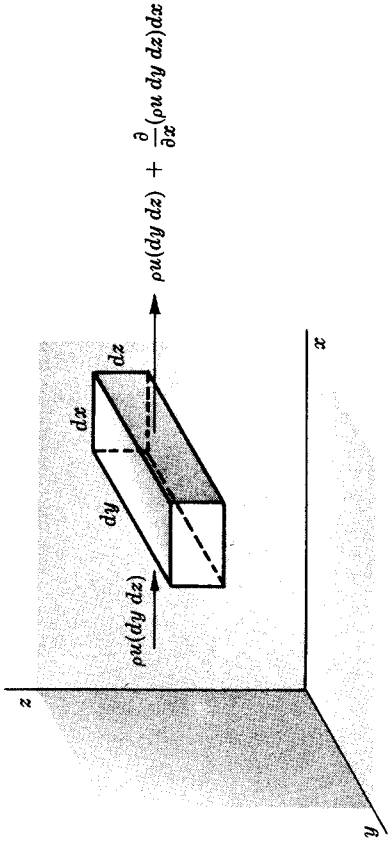
$$u_{\text{aire}} = \frac{p}{RT} = \frac{2,40 \times 10^4}{29,3(27 + 273)} = 2,73 \text{ kg/m}^3$$

$$W = 0,230 \text{ kg/seg} = uQ \quad \text{o} \quad Q = \frac{W}{u} = \frac{0,230 \text{ kg/seg}}{2,73 \text{ kg/m}^3} = 0,084 \text{ m}^3/\text{seg}.$$

$$\text{Área mínima } A \text{ necesaria} = \frac{\text{caudal } Q \text{ en m}^3/\text{seg}}{\text{velocidad media } V} = \frac{0,084}{5,50} = 0,0153 \text{ m}^2 = 153 \text{ cm}^2$$

De aquí, diámetro mínimo = 14 cm

7. Desarrollar la ecuación general de continuidad para un flujo tridimensional de un fluido comprensible (a) en el caso de flujo no permanente, y (b) en el de flujo permanente.



**Fig. 6-2**

**Solución:**

- (a) Sean las componentes de la velocidad en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$ , respectivamente,  $u$ ,  $v$  y  $w$ . Se considera el flujo a través de un paralelepípedo rectángulo de aristas  $dx$ ,  $dy$  y  $dz$ . La masa de fluido entrante, a través de una de sus caras, en dicho volumen por unidad de tiempo es igual al producto de la densidad del fluido por el área de la cara y por la velocidad normal a la cara, es decir, en la dirección  $x$ ,  $\rho u(dy dz)$ . En la dirección  $x$  los flujos aproximados son (véase Fig. 6-2)

$$\text{Flujo entrante } \rho u(dy dz) \quad \text{y} \quad \text{Flujo saliente } \rho u(dy dz) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u dy dz) dx,$$

$$\text{o el flujo entrante aproximado es } -\frac{\partial}{\partial x}(\rho u dy dz) dx \text{ o bien } -\frac{\partial}{\partial x}(\rho u dx dy dz).$$

Si se escriben expresiones análogas para los flujos entrantes netos en las direcciones  $y$  y  $z$ , y sumamos los tres, el flujo neto entrante será

$$-\left[ \frac{\partial}{\partial x} \rho u + \frac{\partial}{\partial y} \rho v + \frac{\partial}{\partial z} \rho w \right] dx dy dz$$

Estas magnitudes son más precisas al hacer tender a cero  $dx$ ,  $dy$  y  $dz$ .

El aumento de masa por unidad de tiempo en el interior del paralelepípedo será

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho dx dy dz) \quad \text{o} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t}(dx dy dz)$$

donde  $\partial\rho/\partial t$  es la variación por unidad de tiempo de la densidad en el interior del volumen. Como el flujo entrante neto ha de ser igual al aumento por unidad de tiempo de la masa, se obtiene

$$-\left[\frac{\partial}{\partial x}\rho u + \frac{\partial}{\partial y}\rho v + \frac{\partial}{\partial z}\rho w\right]dx\,dy\,dz = \frac{\partial\rho}{\partial t}(dx\,dy\,dz)$$

Por tanto, la ecuación de continuidad tridimensional para un fluido no permanente de un fluido compresible toma la forma

$$-\left[\frac{\partial}{\partial x}\rho u + \frac{\partial}{\partial y}\rho v + \frac{\partial}{\partial z}\rho w\right] = \frac{\partial\rho}{\partial t} \quad (A)$$

(b) Para un fluido permanente no varían las propiedades del fluido con el tiempo, es decir,  $\partial\rho/\partial t = 0$ . Para un fluido permanente y compresible la ecuación de continuidad es

$$\left[\frac{\partial}{\partial x}\rho u + \frac{\partial}{\partial y}\rho v + \frac{\partial}{\partial z}\rho w\right] = 0 \quad (B)$$

Si el fluido además de permanente es incompresible ( $\rho = \text{constante}$ ) la ecuación tridimensional adopta la forma

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (C)$$

Si  $\partial w/\partial z = 0$ , el fluido permanente es bidimensional y

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (D)$$

Cuando simultáneamente  $\partial u/\partial z$  y  $\partial v/\partial y = 0$ , el fluido permanente es unidimensional y

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (E)$$

Esta ecuación es la del flujo uniforme.

8. Comprobar si se satisface la ecuación de continuidad para un flujo permanente e incompresible, cuando las componentes de la velocidad vienen dadas por

$$u = 2x^2 - xy + z^2, \quad v = x^2 - 4xy + y^2, \quad w = -2xy - yz + y^2$$

**Solución:**

Derivando cada componente respecto de la coordenada apropiada,

$$\partial u/\partial x = 4x - y, \quad \partial v/\partial y = -4x + 2y, \quad \partial w/\partial z = -y$$

Sustituyendo en la ecuación (C) del problema anterior,  $(4x - y) + (-4x + 2y) + (-y) = 0$ . Luego se satisface.

9. Las componentes de la velocidad de un fluido incompresible no permanente son  $u = (2x - 3y)t$ ,  $v = (x - 2y)t$  y  $w = 0$ . ¿Se satisface la ecuación de continuidad?

**Solución:**

Derivando cada componente respecto de la coordenada apropiada,

$$\partial u/\partial x = 2t, \quad \partial v/\partial y = -2t, \quad \partial w/\partial z = 0$$

Sustituyendo en la ecuación (C) del Problema 7 da 0. Luego se satisface.

10. ¿Son posibles los siguientes valores de  $u$  y  $v$  para un flujo permanente e incompresible?

$$(a) \quad u = 4xy + y^2, \quad v = 6xy + 3x \quad (b) \quad u = 2x^2 + y^2, \quad v = -4xy$$

**Solución:**

Para el flujo bidimensional dado debe satisfacerse la ecuación (D) del Problema 7.

$$(a) \quad \partial u/\partial x = 4y, \quad \partial v/\partial y = 6x, \quad 4y + 6x \neq 0 \quad (b) \quad \partial u/\partial x = 4x, \quad \partial v/\partial y = -4x, \quad 4x - 4x = 0$$

El flujo no es posible.

El flujo es posible.



11. Entre dos placas convergentes de 45 cm de anchura circula un fluido y la distribución de velocidades viene dada por la expresión

$$\frac{v}{v_{\max}} = 2 \frac{n}{n_0} \left(1 - \frac{n}{n_0}\right)$$

Para los valores  $n_0 = 5$  cm y  $v_{\max} = 0,30$  m/seg determinar (a) el caudal total en m<sup>3</sup>/seg, (b) la velocidad media en la sección considerada y (c) la velocidad media en la sección en la que  $n = 2$  cm.

**Solución:**

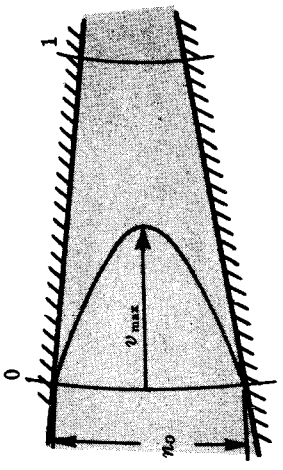
- (a) El flujo por unidad de anchura, perpendicular al dibujo, será

$$q = \int_0^{n_0} v \, dn = \frac{2v_{\max}}{n_0} \int_0^{n_0} (n - n^2/n_0) \, dn = \frac{1}{3} v_{\max} n_0 = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{seg m de anchura}$$

y el caudal total  $Q = 5 \times 10^{-3}(0,45) = 2,25 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{seg}$ .

- (b) La velocidad media  $V_0 = q/n_0 = 0,10$  m/seg, donde  $n_0 = 0,05$  m. O bien  $V_0 = Q/A = 0,10$  m/seg.
- (c) Mediante la ecuación (4),  $V_0 A_{n_0} = V_1 A_{n_1}$ ,  $0,10(0,05)(0,45) = V_1(0,02)(0,45)$ , de donde  $V_1 = 0,25$  m/seg.

Fig. 6-3



12. Si los módulos y direcciones de las velocidades se miden en un plano vertical  $YY$  en puntos distanciados  $\Delta y$ , demostrar que el caudal  $q$  por unidad de anchura puede expresarse por  $\Sigma v_x \Delta y$ .

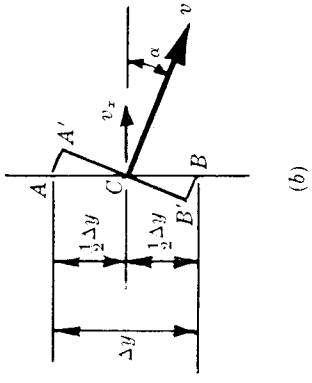
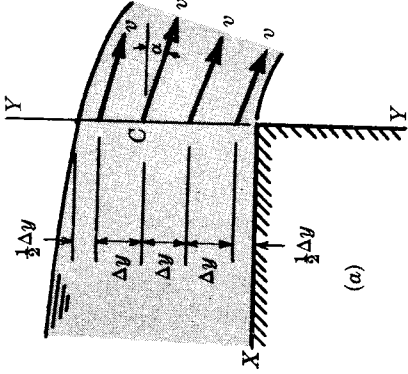


Fig. 6-4

**Solución:**

Caudal por unidad de anchura  $= q = \Sigma \Delta q$ , donde cada  $\Delta q$  viene dado por  $v(\Delta A_n)$ .

De la Fig. 6-4(b),  $A'B' = \Delta A_n = \Delta y \cos \alpha$ . De donde  $q = \Sigma v(\Delta y \cos \alpha) = \Sigma v_x \Delta y$  por unidad de anchura.

13. (a) Explicar brevemente el procedimiento para dibujar la red de corriente en el caso de un flujo bidimensional permanente de un fluido ideal entre los contornos dados en la Figura 6-5.
- (b) Si la velocidad uniforme en la sección 2 es igual a 9,0 m/seg y los valores de  $\Delta n_2$  son iguales a 3 cm, determinar el caudal  $q$  y la velocidad uniforme en la sección 1, donde los  $\Delta n_1$  son iguales a 9 cm.

**Solución:**

(a) El procedimiento para dibujar la red de corriente en este caso puede aplicarse a casos más complejos. Para un fluido *ideal* se procede como sigue:

1. En una sección entre contornos paralelos se divide el flujo en un cierto número de bandas de igual anchura  $\Delta n$  (supuesto que se ha tomado del flujo una capa, de espesor unidad, perpendicular al dibujo). Cada banda representa un tubo de corriente limitado por líneas de corriente o bien por líneas de contorno y uno de los contornos. Así, el flujo total queda dividido en flujos parciales iguales por cada una de las bandas y  $\Delta q \cong v(\Delta n) \cong$  constante, donde  $\Delta n$  se mide normalmente a la velocidad local. Como  $\Delta q \cong v_1 \Delta n_1 \cong v_2 \Delta n_2$ , se deduce  $v_1/v_2 \cong \Delta n_2/\Delta n_1 \cong \Delta S_2/\Delta S_1$ . Cuanto menores son los valores de  $\Delta n$  y  $\Delta S$  más exactas son las relaciones anteriores. Se escogen el número suficiente de líneas de corriente para que la exactitud sea aceptable, sin entrar en innecesarios refinamientos y detalles en el dibujo.
2. Para determinar las *direcciones* de las líneas de corriente se dibujan las líneas normales a aquéllas o líneas equipotenciales. Estas líneas están espaciadas de forma que  $\Delta S = \Delta n$ . Las líneas equipotenciales son ortogonales a las líneas de corriente en cada punto de intersección y a los contornos ya que éstos son líneas de corriente. De esta forma el diagrama obtenido se asemeja a un grupo de cuadrados (aproximadamente) a través de toda la red de corriente.
3. En las zonas próximas y allí donde los contornos cambian de forma no se pueden mantener los cuadrados, variando la configuración de la red de corriente, y para obtenerla de la manera más correcta será necesario comprobarla dibujando las diagonales a través de todos los «cuadrados» (curvilineos). Las dos familias de diagonales formarán también una red aproximadamente cuadrada.
4. Muchas veces los mismos contornos son líneas de corriente verdaderas. Si no sucede así, la red de corriente no representa la configuración real del flujo. Por ejemplo, cuando el flujo se «separa» del contorno, en esta región no puede utilizarse el contorno como una línea de corriente. En general, cuando las líneas de corriente son divergentes se dan las condiciones para que se pueda producir el fenómeno de la separación.

La solución matemática de los flujos irrotacionales está basada en la definición de la *función de corriente*, cuya definición incluye el principio de continuidad y las propiedades de una línea de corriente. El caudal  $\psi$  entre dos líneas de corriente cualesquiera es constante (ya que el flujo no puede atravesar las líneas de corriente), y si  $\psi$  puede expresarse en función de  $x$  e  $y$  pueden dibujarse las líneas de corriente. Análogamente, las líneas equipotenciales pueden definirse por  $\phi(x, y) =$  constante. A partir de estas expresiones es factible deducir que

$$u = \partial\psi/\partial y \quad y \quad v = -\partial\psi/\partial x \quad \text{para las líneas de corriente}$$

$$y \quad u = -\partial\phi/\partial x \quad y \quad v = -\partial\phi/\partial y \quad \text{para las líneas equipotenciales}$$

Estas ecuaciones han de satisfacer a la ecuación de Laplace, es decir,

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0$$

y la ecuación de continuidad

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

En general, se determinan y dibujan las funciones equipotenciales. A continuación se trazan las líneas de corriente, ortogonales a las anteriores, obteniendo la red de corriente.

Este tipo de soluciones exactas pueden verse en textos de Mecánica de Fluidos Superiores, en Hidrodinámicas o en los de Teoría de Funciones de Variable Compleja.

(b) Caudal/unidad de anchura =  $q = \Sigma \Delta q = q_a + q_b + q_c + q_d + q_e = 5(v_2)(A_{n_2})$ .

Para 1 unidad de anchura,  $A_{n_2} = 1(\Delta n_2)$  y  $q = 5(9,0)(1 \times 0,03) = 1,35 \text{ m}^3/\text{seg}$  por unidad de anchura.

Por tanto, para  $\Delta n_1 = 0,09 \text{ m}$ ,  $5 v_1(0,09 \times 1) = 1,35$ , de donde  $v_1 = 3,0 \text{ m/seg}$ .

$v_1$  puede determinarse también a partir de:  $v_1/v_2 \cong \Delta n_2/\Delta n_1$ ,  $v_1/9,0 \cong 0,03/0,09$ ,  $v_1 = 3,0 \text{ m/seg}$ .

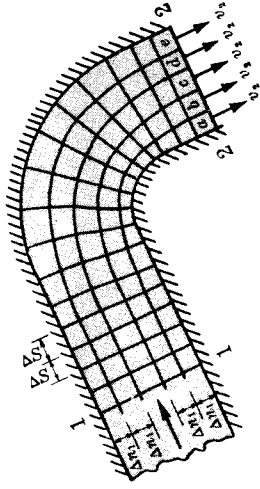


Fig. 6-5

14. Dibujar las líneas de corriente y equipotenciales para las condiciones de contorno dadas en l Fig. 6-6. (Las áreas que están sin terminar de dibujar se dejan para que las utilice el lector.)

**Solución:**

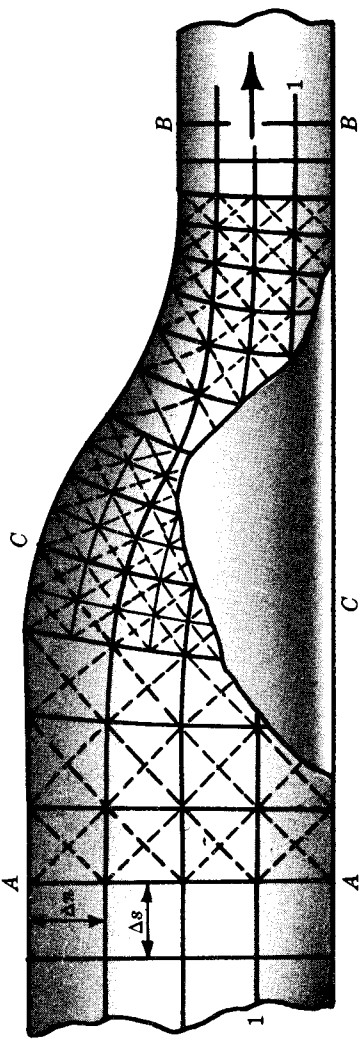


Fig. 6-6

1. En las zonas donde el flujo tiene lugar entre contornos paralelos se divide la anchura total en 4 partes iguales o tubos de corriente (en *AA* y en *BB*). Hay que tratar de dibujar la trayectoria de una partícula a lo largo  $\epsilon$  una de estas líneas de corriente, dibujando, por ejemplo, la línea 1-1 (véase el problema precedente). Se procede en igual forma con el resto de las líneas de corriente.
2. Las líneas equipotenciales han de ser ortogonales, tanto a las líneas de corriente como a los contornos,  $\epsilon$  todos los puntos. Se han de esquematizar de manera que formen aproximadamente cuadrados. Partiendo de la sección central, se dibujan estas líneas ortogonales en cada dirección. Antes de obtener una red de corriente de manera satisfactoria será necesario utilizar con frecuencia la goma de borrar.
3. Se dibujan las diagonales (a trazos en la figura) para comprobar la bondad de la red de corriente. Estas diagonales deben formar también una red cuadrada.
4. En la figura la zona *C* se ha dividido en 8 tubos de corriente. Se observa que los cuadriláteros curvilineos más pequeños se aproximan en su forma a cuadrados más que los de mayor tamaño. Cuanto mayor sea  $\epsilon$  número de tubos de corriente, la red de corriente será más «cuadrada».

15. En la Fig. 6-7 se representa una línea de corriente correspondiente a un flujo bidimensional y las líneas equipotenciales, ortogonales a las primeras, y representadas por los segmentos numerados del 1 al 10. La separación entre las líneas equipotenciales se da en la segunda columna de la tabla que figura más adelante. Si la velocidad media entre 1 y 2 es 0,500 m/seg, calcular (a) las velocidades medias entre cada dos líneas equipotenciales y (b) el tiempo que tardará una partícula fluida en recorrer el espacio entre 1 y 10 a lo largo de la línea de corriente.

**Solución:**

- (a) Utilizando las relaciones entre la velocidad y  $\Delta n$  del Problema 13,

$$V_{1-2} \Delta n_{1-2} = V_{2-3} \Delta n_{2-3} = V_{3-4} \Delta n_{3-4} = \dots$$

Además

$$\Delta S_{1-2} \cong \Delta n_{1-2}, \quad \Delta S_{2-3} \cong \Delta n_{2-3}, \quad \dots$$

Por tanto,  $V_{2-3} \cong V_{1-2} (\Delta S_{1-2} / \Delta S_{2-3}) = 0,500 (0,500 / 0,400) = 0,625$  m/seg. Análogamente,  $V_{3-4} = 0,500 (0,500 / 0,300) = 0,833$  m/seg, etc. Los valores así obtenidos para las velocidades medias se dan en la siguiente tabla.

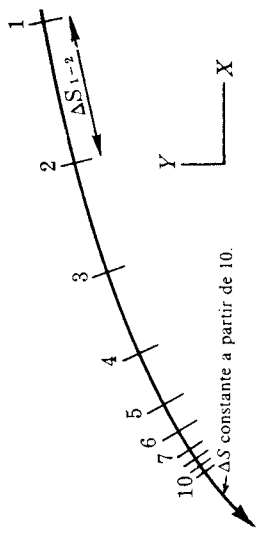


Fig. 6-7

| Posición | $\Delta S$ (m) | $\Delta S_{1-2}/\Delta S$ | $V = 0,500(0,500/\Delta S)$<br>m/seg | $t = (\Delta S)/V$<br>seg |
|----------|----------------|---------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| 1-2      | 0,500          | 1,000                     | 0,500                                | 1,000                     |
| 2-3      | 0,400          | 1,250                     | 0,625                                | 0,640                     |
| 3-4      | 0,300          | 1,667                     | 0,833                                | 0,360                     |
| 4-5      | 0,200          | 2,500                     | 1,250                                | 0,160                     |
| 5-6      | 0,100          | 5,000                     | 2,500                                | 0,040                     |
| 6-7      | 0,0700         | 7,143                     | 3,571                                | 0,020                     |
| 7-8      | 0,0450         | 11,11                     | 5,56                                 | 0,008                     |
| 8-9      | 0,0300         | 16,67                     | 8,33                                 | 0,004                     |
| 9-10     | 0,0208         | 24,00                     | 12,00                                | 0,002                     |
|          |                |                           |                                      | $\Sigma = 2,234$ seg      |

- (b) El tiempo que tarda una partícula en recorrer de 1 a 2 es igual a la distancia entre 1 y 2 dividida por la velocidad media entre 1 y 2 o bien  $t_{1-2} = (0,500/0,500) = 1,000$  seg. Análogamente,  $t_{2-3} = (0,400/0,625) = 0,640$  seg. El tiempo total que tarda en recorrer la distancia entre 1 y 10 es igual a la suma de los términos de la última columna, es decir, 2,234 seg.

16. Deducir la expresión del coeficiente  $\alpha$  de corrección de la energía cinética para un flujo permanente e incompresible.

**Solución:**

La energía cinética de una partícula es  $\frac{1}{2} dM v^2$ , y la energía total de un flujo fluido será

$$\frac{1}{2} \int_A (dM) v^2 = \frac{1}{2} \int_A \frac{w}{g} (dQ) v^2 = \frac{w}{2g} \int_A (v dA) v^2$$

Para calcular esta expresión debe extenderse la integral a toda el área  $A$ .

La energía cinética calculada mediante la velocidad media en una sección transversal es  $\frac{1}{2}(wQ/g)V_{av}^2 = \frac{1}{2}(wA/g)V_{av}^3$ . Aplicando a esta expresión un coeficiente de corrección  $\alpha$  e igualando el resultado a la energía cinética verdadera, se obtiene

$$\alpha \left( \frac{wA}{2g} \right) (V_{av}^3) = \frac{w}{2g} \int_A (v dA) v^2 \quad \text{o} \quad \alpha = \frac{1}{A} \int_A \left( \frac{v}{V_{av}} \right)^3 dA$$

17. Un líquido está fluyendo a través de una tubería circular. Para una distribución de velocidades dada por la ecuación  $v = v_{\max}(r_0^2 - r^2)/r_0^2$ , calcular el coeficiente de corrección de la energía cinética  $\alpha$ .

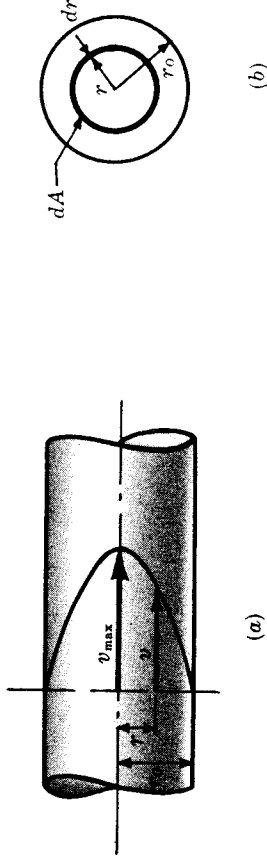


Fig. 6-8

**Solución:**

Es necesario calcular la velocidad media para aplicar la fórmula obtenida en el Problema 16. A partir de la ecuación de continuidad,

$$V_{av} = \frac{Q}{A} = \frac{\int v dA}{\pi r_0^2} = \frac{\int (v_{\max}/r_0^2)(r_0^2 - r^2)(2\pi r dr)}{\pi r_0^2} = \frac{2v_{\max}}{r_0^4} \int_0^{r_0} (r_0^2 r - r^3) dr = \frac{v_{\max}}{2}$$

Este valor podría haberse obtenido también al considerar que la ecuación dada representa una parábola y que el volumen del paraboloide generado por dicha distribución es igual a la mitad del volumen del cilindro circunscrito. Por tanto,

$$V_{av} = \frac{\text{volumen/seg}}{\text{área de la base}} = \frac{\frac{1}{2}(\pi r_0^2)v_{\max}}{\pi r_0^2} = \frac{v_{\max}}{2}$$

Utilizando el valor de la velocidad media en la ecuación que da  $\alpha$ ,

$$\alpha = \frac{1}{A} \int_A \left( \frac{v}{V_{av}} \right)^3 dA = \frac{1}{\pi r_o^2} \int_0^{r_o} \left( \frac{v_{max}(r_o^2 - r^2)/r_o^2}{\frac{1}{2}v_{max}} \right)^3 2\pi r dr = 2,00$$

(Véase Flujo laminar en el Capítulo 7.)

18. A través de una tubería de 15 cm de diámetro está fluyendo aceite de densidad relativa 0,750 a una presión de 1,05 kg/cm<sup>2</sup>. Si la energía total respecto de un plano de referencia situado 2,40 m por debajo del eje de la tubería es de 17,6 kgm/kg, determinar el caudal de aceite en m<sup>3</sup>/seg.

**Solución:**

Energía por kg de aceite = energía de presión + energía cinética (altura + energía de velocidad) + potencial

$$17,6 = \frac{1,05 \times 10^4}{0,750 \times 1000} + \frac{V_{15}^2}{2g} + 2,40$$

de donde  $V_{15} = 4,85$  m/seg. Por tanto,  $Q = A_{15}V_{15} = \frac{1}{4}\pi(0,15)^2 \times 4,85 = 86 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/seg.

19. Una turbina produce 600 CV cuando el caudal de agua a través de la misma es de 0,60 m<sup>3</sup>/seg. Suponiendo un rendimiento del 87 %, ¿qué altura actúa sobre la turbina?

**Solución:**

Potencia de salida (CV) = potencia consumida (CV)  $\times$  rendimiento =  $(wQH_T/75) \times$  rendimiento  
 $600 = (1000 \times 0,60 \times H_T/75)(0,87) \quad y \quad H_T = 86,3 \text{ m.}$

20. Deducir las ecuaciones del movimiento para un flujo permanente y un fluido cualquiera.
- Solución:**

Se considera como cuerpo libre la masa elemental de fluido  $dM$  mostrada en la Fig. 6-9(a) y (b). El movimiento tiene lugar en el plano del papel y se escoge el eje  $x$  paralelo a la dirección del movimiento. No se han representado las fuerzas que actúan sobre el cuerpo libre  $dM$  en dirección normal al movimiento. Las fuerzas que actúan en la dirección  $x$  se deben a (1) las presiones que actúan sobre las caras de los extremos, (2) la componente del peso y (3) las fuerzas cortantes ( $dF_s$  en kilogramos) ejercidas por las partículas fluidas adyacentes.

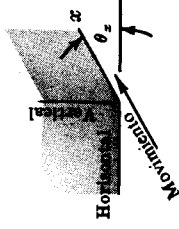
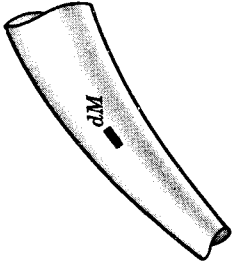


Fig. 6-9(a)

Fig. 6-9(b)

De la ecuación del movimiento  $\Sigma F_x = Ma_x$ , se obtiene

$$[+ p dA - (p + dp)dA - w dA dl \sin \theta_x - dF_s] = \frac{w dA dl}{g} \left( \frac{dV}{dt} \right) \quad (1)$$

Dividiendo (1) por  $w dA$  y sustituyendo  $dl/dt$  por la velocidad  $V$ ,

$$\left[ \frac{p}{w} - \frac{p}{w} - \frac{dp}{w} - dl \sin \theta_x - \frac{dF_s}{w dA} \right] = \frac{V dV}{g} \quad (2)$$

El término  $\frac{dF_s}{w dA}$  representa la resistencia que se opone al movimiento en la longitud  $dl$ . Las fuerzas cortantes  $dF_s$  pueden sustituirse por el producto de la tensión cortante  $\tau$  por el área sobre la que actúa (perímetro  $\times$  longitud), es decir,  $dF_s = \tau dP dl$ .

Así,  $\frac{dF_s}{w dA} = \frac{\tau dP dl}{w dA} = \frac{\tau dl}{w R}$ , donde  $R$  se conoce con el nombre de radio hidráulico y se define como el cociente del área de la sección recta por el perímetro mojado o, en este caso,  $dA/dP$ . La suma del trabajo realizado por todas las fuerzas cortantes mide la pérdida de energía debida al flujo, y, medida en  $\text{kgm/kg}$ , será

$$\text{pérdida de carga } dh_L = \frac{\tau dl}{w R} = \frac{\text{kg/m}^2 \times \text{m}}{\text{kg/m}^3 \times \text{m}^2/\text{m}} = \text{m}$$

Para futuras referencias,

$$\tau = w R \left( \frac{dh_L}{dl} \right) \quad (3)$$

Volviendo sobre la expresión (2), como  $dl \sin \theta_x = dz$ , adopta finalmente la forma

$$\frac{dp}{w} + \frac{V dV}{g} + dz + dh_L = 0 \quad (4)$$

Esta expresión se conoce con el nombre de ecuación de Euler cuando se aplica a un fluido ideal (pérdida de carga = 0). Al integrar la ecuación anterior, para fluidos de densidad constante, se obtiene la llamada ecuación de Bernoulli. La ecuación diferencial (4), para flujos permanentes, es una de las ecuaciones fundamentales del flujo de fluidos.

### CASO 1. Flujo de fluidos incompresibles

Para fluidos *incompresibles* la integración es como sigue:

$$\int_{z_1}^{z_2} \frac{dp}{w} + \int_{v_1}^{v_2} \frac{V dV}{g} + \int_{z_1}^{z_2} dz + \int_1^2 dh_L = 0 \quad (A)$$

Los métodos de cálculo del último término se discutirán en los capítulos siguientes. El término de la pérdida de carga total se representa por  $H_L$ . Al integrar y sustituir límites,

$$\left( \frac{p_2}{w} - \frac{p_1}{w} \right) + \left( \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) + (z_2 - z_1) + H_L = 0$$

$$\left( \frac{p_1}{w} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 \right) - H_L = \left( \frac{p_2}{w} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \right)$$

que es la forma más conocida del teorema de Bernoulli, aplicable al flujo de fluidos incompresibles (sin adición de energía exterior).

### CASO 2. Flujo de fluidos compresibles.

Para fluidos compresibles el término  $\int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{w}$  no puede integrarse hasta no conocer la expresión de  $w$  en función de la variable  $p$ . La relación entre  $w$  y  $p$  depende de las condiciones termodinámicas implicadas.

(a) Para condiciones *isotérmicas* (temperatura constante) la ecuación general de los gases puede expresarse en la forma

$$p_1/w_1 = p/w = \text{constante} \quad \text{o} \quad w = (w_1/p_1)p$$

donde  $w_1/p_1$  es una constante y  $p$  viene en  $\text{kg/m}^2$ , siendo presión *absoluta*. Sustituyendo en la ecuación (A),

$$\int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{(w_1/p_1)p} + \int_{v_1}^{v_2} \frac{V dV}{g} + \int_{z_1}^{z_2} dz + \int_1^2 dh_L = 0$$

Integrando y sustituyendo límites,  $\frac{p_1}{w_1} \ln \frac{p_2}{p_1} + \left( \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) + (z_2 - z_1) + H_L = 0$  o bien puesta en la forma más conocida,

$$\frac{p_1}{w_1} \ln \frac{p_1}{p_2} + z_1 - H_L = \frac{p_1}{w_1} \ln \frac{p_2}{p_1} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (B)$$

Al combinar esta ecuación con la de continuidad y la ley de los gases perfectos, para condiciones isotérmicas, se llega a una expresión en la que solo es desconocida una velocidad. Así, para un flujo permanente,

$$w_1 A_1 V_1 = w_2 A_2 V_2 \quad \text{y} \quad \frac{p_1}{w_1} = \frac{p_2}{w_2} \quad \text{de donde} \quad V_1 = \frac{w_2 A_2 V_2}{(w_2/p_2)p_1 A_1} = \frac{A_2}{A_1} \left( \frac{p_2}{p_1} \right) V_2$$

Sustituyendo en la ecuación de Bernoulli en su forma (B),

$$\left[ \frac{p_1}{w_1} \ln p_1 + \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^2 \frac{V_2^2}{2g} + z_1 \right] - H_L = \left[ \frac{p_1}{w_1} \ln p_2 + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \right] \quad (C)$$

- (b) Para condiciones *adiabáticas* (sin pérdida ni ganancia de calor) la ley general de los gases perfectos se reduce a

$$\left( \frac{w}{w_1} \right)^k = \frac{p}{p_1} \quad \text{o} \quad \frac{p^{1/k}}{w_1} = \frac{p^{1/k}}{w} = \text{constante,} \quad \text{y así} \quad w = w_1 \left( \frac{p}{p_1} \right)^{1/k}$$

donde  $k$  es el exponente adiabático.

Hallando el valor de  $dp/w$  e integrando se obtiene

$$\int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{w_1 (p/p_1)^{1/k}} = \frac{p_1^{1/k}}{w_1} \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p^{1/k}} = \left( \frac{k}{k-1} \right) \times \frac{p_1}{w_1} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right]$$

y la ecuación de Bernoulli toma la forma

$$\left[ \left( \frac{k}{k-1} \right) \frac{p_1}{w_1} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 \right] - H_L = \left[ \left( \frac{k}{k-1} \right) \left( \frac{p_2}{w_2} \right) \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \right] \quad (D)$$

Combinando esta ecuación con la de continuidad y con la ley de los gases perfectos, para condiciones adiabáticas, se llega a una expresión en que solo figura una velocidad como incógnita.

$$\text{Mediante } w_1 A_1 V_1 = w_2 A_2 V_2 \quad \text{y} \quad \frac{p_1^{1/k}}{w_1} = \frac{p_2^{1/k}}{w_2} = \text{constante,} \quad V_1 = \frac{w_2 A_2 V_2}{w_1 A_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{1/k} \left( \frac{A_2}{A_1} \right) V_2$$

y la ecuación de Bernoulli adopta la forma

$$\left[ \left( \frac{k}{k-1} \right) \frac{p_1}{w_1} + \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{2/k} \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \frac{V_2^2}{2g} + z_1 \right] - H_L = \left[ \left( \frac{k}{k-1} \right) \left( \frac{p_2}{w_2} \right) \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \right] \quad (E)$$

21. En la Fig. 6-10 están circulando 0,370 m<sup>3</sup>/seg de agua de  $A$  a  $B$ , existiendo en  $A$  una altura de presión de 6,6 m. Suponiendo que no existen pérdidas de energía entre  $A$  y  $B$ , determinar la altura de presión en  $B$ . Dibujar la línea de alturas totales.

**Solución:**

Se aplica la ecuación de Bernoulli entre  $-A$  y  $B$ , tomando como plano de referencia el horizontal que pasa por  $A$ .

Energía en  $A$  + energía añadida – energía perdida = energía en  $B$

$$\left( \frac{p_A}{w} + \frac{V_{30}^2}{2g} + z_A \right) + 0 - 0 = \left( \frac{p_B}{w} + \frac{V_{60}^2}{2g} + z_B \right)$$

donde  $V_{30} = Q/A_{30} = 0,370/(\frac{1}{4}\pi 0,3^2) = 5,24$  m/seg y  $V_{60} = (\frac{1}{2})^2 (5,24) = 1,31$  m/seg. Sustituyendo,

$$\left( 6,6 + \frac{(5,24)^2}{2g} + 0 \right) - 0 = \left( \frac{p_B}{w} + \frac{(1,31)^2}{2g} + 4,5 \right) \quad \text{y} \quad \frac{p_B}{w} = 3,41 \text{ m de agua}$$

Puede representarse la energía total en una sección cualquiera como altura sobre un plano horizontal de referencia. Utilizando en este caso el plano que pasa por  $D$ – $D$ ,

$$\text{Altura total en } A = p_A/w + V_{30}^2/2g + z_A = 6,6 + 1,4 + 3,0 = 11,0 \text{ m}$$

$$\text{Altura total en } B = p_B/w + V_{60}^2/2g + z_B = 3,41 + 0,09 + 7,5 = 11,0 \text{ m}$$

Se observa que tiene lugar la transformación de una forma de energía en otra durante el flujo. En el caso presente, parte de la energía de presión y de la energía cinética en  $A$  se transforma en energía potencial en  $B$ .

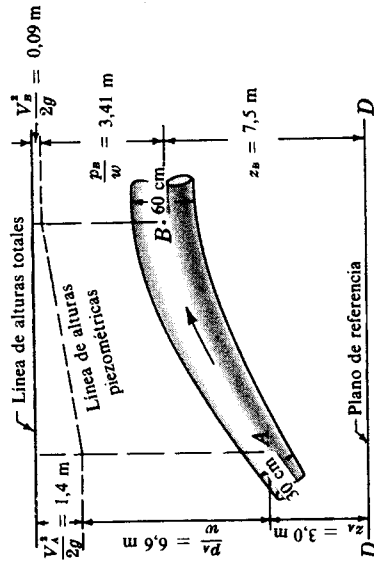


Fig. 6-10

22. En el venturímetro mostrado en la Fig. 6-11 la lectura del manómetro diferencial de mercurio es 35,8 cm. Determinar el caudal de agua a través del venturímetro si se desprecian las pérdidas entre  $A$  y  $B$ .

**Solución:**

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre  $A$  y  $B$ , tomando como plano de referencia el horizontal que pasa por  $A$ ,

$$\left(\frac{p_A}{w} + \frac{V_{30}^2}{2g} + 0\right) - 0 = \left(\frac{p_B}{w} + \frac{V_{15}^2}{2g} + 0,75\right)$$

$$\text{y} \quad \left(\frac{p_A}{w} - \frac{p_B}{w}\right) = \left(\frac{V_{15}^2}{2g} - \frac{V_{30}^2}{2g} + 0,75\right) \quad (I)$$

Por la ecuación de continuidad  $A_{30}V_{30} = A_{15}V_{15}$ , de donde  $V_{30} = \left(\frac{15}{30}\right)^2 V_{15} = \frac{1}{4}V_{15}$ , y  $V_{30}^2 = \frac{1}{16}V_{15}^2$ . Por la lectura manométrica, altura de presión en  $L$  = altura de presión en  $R$  (m de agua)

$$p_A/w + z + 0,358 = p_B/w + 0,75 + z + (0,358)(13,6)$$

de la cual  $(p_A/w - p_B/w) = 5,26$  m de agua. Sustituyendo en (I), se obtiene  $V_{15} = 9,7$  m/seg y  $Q = \frac{1}{4}\pi(0,15)^2 \times 9,7 = 0,172$  m<sup>3</sup>/seg.

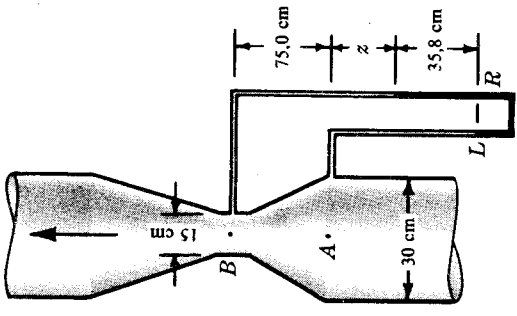


Fig. 6-11

23. Una tubería, que transporta aceite de densidad relativa 0,877, pasa de 15 cm de diámetro, en la sección  $E$ , a 45 cm en la sección  $R$ . La sección  $E$  está 3,6 m por debajo de  $R$  y las presiones son respectivamente 0,930 kg/cm<sup>2</sup> y 0,615 kg/cm<sup>2</sup>. Si el caudal es de 146 l/seg, determinar la pérdida de carga en la dirección del flujo.

**Solución:**

Velocidad media en una sección =  $Q/A$ . Por tanto,

$$V_{15} = \frac{0,146}{\frac{1}{4}\pi(0,15)^2} = 8,26 \text{ m/seg} \quad \text{y} \quad V_{45} = \frac{0,146}{\frac{1}{4}\pi(0,45)^2} = 0,92 \text{ m/seg}$$

Utilizando, como plano de referencia, el horizontal que pasa por la sección más baja  $E$ , la energía en cada sección será:

$$\text{en } E, \quad \left(\frac{p}{w} + \frac{V_{15}^2}{2g} + z\right) = \frac{0,930 \times 10^4}{0,877 \times 1000} + \frac{(8,26)^2}{2g} + 0 = 13,75 \text{ kgm/kg}$$

$$\text{en } R, \quad \left(\frac{p}{w} + \frac{V_{45}^2}{2g} + z\right) = \frac{0,615 \times 10^4}{0,877 \times 1000} + \frac{(0,92)^2}{2g} + 3,60 = 10,65 \text{ kgm/kg}$$

El flujo tiene lugar de  $E$  a  $R$ , ya que la energía de  $E$  es mayor que la de  $R$ . La pérdida de carga se determina haciendo el balance de energía entre  $E$  y  $R$ , tomando como plano de referencia el horizontal que pasa por  $E$ : 13,75 - pérdida de carga = 10,65 o bien pérdida de carga = 3,10 m, de  $E$  a  $R$ .

24. Considerar que a través del venturímetro del Problema 22 fluye aire a 27° C y que la presión manométrica en  $A$  es igual a 2,65 kg/cm<sup>2</sup>. La lectura del manómetro es de 35,8 cm de agua. Suponiendo que el peso específico del aire no varía entre  $A$  y  $B$  y que la pérdida de energía es despreciable, determinar el caudal en peso, kg/seg, de aire que está circulando.

**Solución:**

Aplicando la ecuación de la energía entre  $A$  y  $B$ , tomando como plano de referencia el que pasa por  $A$ , como en el Problema 22, se obtiene  $\left(\frac{p_A}{w} - \frac{p_B}{w}\right) = \frac{15}{16} \frac{V_{15}^2}{2g} + 0,75$ . (I)

Para obtener la altura de presión del fluido que circula es necesario calcular el peso específico del aire.

$$w = \frac{p}{RT} = \frac{(2,65 + 1,030)10^4}{29,3(27 + 273)} = 4,20 \text{ kg/m}^3$$



En el manómetro diferencial,  $p_L = p_R$  (en  $\text{kg/m}^2$ , manométrica)  
 o bien  $p_A + 4,20(z + 0,358) = p_B + 4,20(0,75 + z) + 1000(0,358)$   
 y  $(p_A - p_B) = 359,6 \text{ kg/m}^2$ . Sustituyendo en (1), se obtiene  $V_{1s} = 42,2 \text{ m/seg}$  y  
 $W = uQ = 4,20[\frac{1}{4}\pi(0,15)^2 \times 42,2] = 3,12 \text{ kg/seg}$  de aire

25. Un conducto por el que circula aire reduce su sección recta de  $7,0 \times 10^{-2} \text{ m}^2$  a  $2,0 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ . Suponiendo que no existen pérdidas, ¿cuál es la variación de presión que tiene lugar si están fluyendo  $0,70 \text{ kg/seg}$  de aire? (Utilizar  $w = 3,200 \text{ kg/m}^3$  para la presión y temperatura implicadas)

**Solución:**

$$Q = \frac{0,70 \text{ kg/seg}}{3,2 \text{ kg/m}^3} = 0,218 \text{ m}^3/\text{seg}, V_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{0,218}{0,07} = 3,12 \text{ m/seg}, V_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{0,218}{0,02} = 10,9 \text{ m/seg}.$$

Al aplicar la ecuación de Bernoulli entre las secciones 1 y 2 se obtiene

$$\left(\frac{p_1}{w} + \frac{(3,12)^2}{2g} + 0\right) - 0 = \left(\frac{p_2}{w} + \frac{(10,9)^2}{2g} + 0\right) \quad \text{o bien} \quad \left(\frac{p_1}{w} - \frac{p_2}{w}\right) = 5,60 \text{ m de aire}$$

y  $p_1' - p_2' = (5,60 \times 3,200)/10^4 = 1,8 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^2$ , como variación de presión. Esta pequeña variación en la presión justifica la hipótesis de densidad constante del fluido.

26. Una tubería de 15 cm de diámetro y 180 m de longitud transporta agua desde A, a una elevación de 24,0 m, hasta B, a una elevación de 36,0 m. La tensión debida a la fricción entre el líquido y la: paredes de la tubería es igual a  $3,05 \text{ kg/m}^2$ . Determinar la variación de presión en la tubería y la pérdida de carga.

**Solución:**

(a) Las fuerzas que actúan sobre la masa de agua son las mismas que aparecen en la Figura (b) del Problema 20.

Mediante  $P_1 = p_1 A_{1s}$ ,  $P_2 = p_2 A_{1s}$  se obtiene, aplicando  $\Sigma F_x = 0$ ,

$$p_1 A_{1s} - p_2 A_{1s} - W \text{ sen } \theta_x - \tau(\pi d)L = 0$$

Ahora bien,  $W = w(\text{volumen}) = 1000[\frac{1}{4}\pi(0,15)^2 \times 180]$  y  $\text{sen } \theta_x = (36,0 - 24,0)/180$ . Por tanto,

$$p_1[\frac{1}{4}\pi(0,15)^2] - p_2[\frac{1}{4}\pi(0,15)^2] - 1000[\frac{1}{4}\pi(0,15)^2 \times 180] \times 12/180 - 3,05(\pi \times 0,15 \times 180) = 0$$

de donde  $p_1 - p_2 = 26.640 \text{ kg/m}^2 = 2,664 \text{ kg/cm}^2$ .

(b) Mediante la ecuación de la energía, tomando como plano de referencia el horizontal que pasa por A,

energía en A - pérdida de carga = energía en B

$$\left(\frac{p_A}{w} + \frac{V_A^2}{2g} + 0\right) - \text{pérdida de carga} = \left(\frac{p_B}{w} + \frac{V_B^2}{2g} + 12\right)$$

o pérdida de carga =  $(p_A/w - p_B/w) - 12 = 26.640/1000 - 12 = 14,64 \text{ m}$ .

**Otro método:**

$$\text{Mediante la (3) del Problema 20, pérdida de carga} = \frac{\tau L}{wR} = \frac{3,05(180)}{1000(0,15/4)} = 14,64 \text{ m}.$$

27. El agua, a  $32^\circ \text{C}$ , contenida en un pozo debe ser extraída a una velocidad de  $2,0 \text{ m/seg}$  a través de la tubería de succión de una bomba. Calcular la altura teórica máxima a que puede colocarse la bomba bajo las siguientes condiciones: presión atmosférica =  $1,00 \text{ kg/cm}^2$  (ab), presión de vapor =  $0,05 \text{ kg/cm}^2$  (ab) [véase Tabla 1(C)] y pérdida de carga en la tubería de succión = 3 veces la altura de velocidad.

**Solución:**

El peso específico del agua a 32 °C es, según la Tabla 1(C), 995 kg/m<sup>3</sup>. La presión mínima a la entrada de la bomba no puede exceder a la presión del vapor del líquido. Se aplica ahora la ecuación de la energía entre la superficie libre del agua fuera de la tubería de succión y la sección de entrada en la bomba, utilizando alturas de presión absolutas.

Energía en la superficie del agua — pérdida de carga = energía en la entrada de la bomba

$$\left( \frac{1,00 \times 10^4}{995} + 0 + 0 \right) - \frac{3(2,0)^2}{2g} = \left( \frac{0,05 \times 10^4}{995} + \frac{(2,0)^2}{2g} + z \right)$$

de donde  $z = 8,74$  m sobre la superficie libre del agua.

En estas condiciones es probable que tengan lugar serios deterioros debidos a la cavitación. Véase Capítulo 12.

- 28.** En el sistema mostrado en la Fig. 6-12 la bomba *BC* debe producir un caudal de 160 l/seg de aceite,  $D_r = 0,762$ , hacia el recipiente *D*. Suponiendo que la pérdida de energía entre *A* y *B* es de 2,50 kgm/kg y entre *C* y *D* es de 6,50 kgm/kg, (a) ¿qué potencia en CV debe suministrar la bomba a la corriente? (b) Dibujar la línea de alturas totales.

**Solución:**

- (a) La velocidad de las partículas en *A* y *D* es tan pequeña que pueden despreciarse las alturas de velocidad.

La ecuación de la energía entre *A* y *D*, con plano de referencia el que pasa por *BC* (también podría tomarse el que pasa por *A*),

$$\left( \frac{p_A}{w} + \frac{V_A^2}{2g} + z_A \right) + H_{\text{bomba}} - H_{\text{perd}} = \left( \frac{p_D}{w} + \frac{V_D^2}{2g} + z_D \right)$$

$$(0 + \text{desprec.} + 12) + H_{\text{bomba}} - (2,50 + 6,50) = (0 + \text{desprec.} + 57)$$

$$\text{y } H_{\text{bomba}} = 54,0 \text{ m (o kgm/kg).}$$

Potencia (CV) =  $wQH_{\text{bomba}}/75 = (0,762 \times 1000)(0,16)(54)/75 = 88$  CV suministrada al sistema.

Obsérvese que la bomba ha de suministrar una carga suficiente para subir el líquido 45,0 m y vencer las cargas debidas a las pérdidas en las tuberías. Por tanto, comunica al sistema una carga de 54,0 m.

- (b) La línea de alturas totales en *A* tiene una elevación de 15,0 m sobre el plano de referencia de cota cero. De *A* a *B* la pérdida de energía es de 2,5 m y la línea de alturas totales caerá esta misma altura, lo que da en *B* una elevación de 12,5 m. La bomba comunica una energía por unidad de peso de 54,0 m y la elevación en *C* será de 66,5 m. Finalmente, la pérdida de energía entre *C* y *D* es de 6,5 m y la elevación en *D* = 66,5 – 6,5 = 60,0 m. Estos resultados se reflejan en la Figura 6-12.

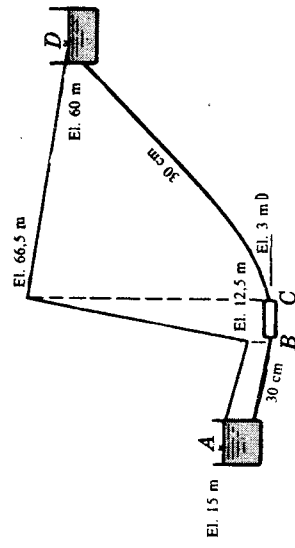


Fig. 6-12

- 29.** A través de la turbina de la Fig. 6-13 circulan 0,22 m<sup>3</sup>/seg de agua y las presiones en *A* y *B* son iguales, respectivamente, a 1,50 kg/cm<sup>2</sup> y –0,35 kg/cm<sup>2</sup>. Determinar la potencia en CV comunicada por la corriente de agua a la bomba.

**Solución:**

Mediante la ecuación de la energía entre *A* y *B* (plano de referencia por *B*), con

$$V_{30} = 0,22/A_{30} = 3,12 \quad \text{y} \quad V_{60} = 3,12/4 = 0,78 \text{ m/seg.}$$

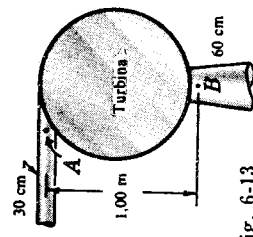


Fig. 6-13

$$\left( \frac{p_A}{w} + \frac{V_{30}^2}{2g} + z_A \right) + 0 - H_{\text{Turbina}} = \left( \frac{p_B}{w} + \frac{V_{60}^2}{2g} + z_B \right)$$

$$\left( \frac{1,5 \times 10^4}{1000} + \frac{3,12^2}{2g} + 1,00 \right) - H_T = \left( \frac{-0,35 \times 10^4}{1000} + \frac{0,78^2}{2g} + 0 \right) \quad \text{y} \quad H_T = 20,0$$

Potencia (CV) =  $wQH_T/75 = 1000(0,22)(20,0)/75 = 59,0$  CV comunicados a la turbina.

- 30.** En la turbina del Problema 29, si la potencia extraída de la corriente es de 68,0 CV y las presiones manométricas en *A* y *B* son 1,45 kg/cm<sup>2</sup> y -0,34 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente, ¿cuál es el caudal de agua que está fluyendo?

**Solución:**

Aplicando la ecuación de la energía entre *A* y *B* (plano de referencia el que pasa por *B*),

$$\left( \frac{1,45 \times 10^4}{1000} + \frac{V_{30}^2}{2g} + 1,0 \right) - H_T = \left( \frac{-0,34 \times 10^4}{1000} + \frac{V_{60}^2}{2g} + 0 \right) \quad \text{y}$$

$$(a) \quad H_T = \left( \frac{1,79 \times 10^4}{1000} + 1,0 + \frac{V_{30}^2}{2g} - \frac{V_{60}^2}{2g} \right)$$

$$(b) \quad A_{30}V_{30} = A_{60}V_{60} \quad \text{o} \quad \frac{V_{60}^2}{2g} = \left( \frac{1}{2} \right)^4 \frac{V_{30}^2}{2g} = \frac{1}{16} \frac{V_{30}^2}{2g}$$

$$(c) \quad 68,0 \text{ CV} = \frac{wQH_T}{75} = \frac{1000 \times \frac{1}{4}\pi(0,30)^2 V_{30} \times H_T}{75} \quad \text{o} \quad H_T = \frac{72,2}{V_{30}}$$

Mediante las ecuaciones (a) y (c) (sustituyendo la altura de velocidad),  $72,2/V_{30} = 18,9 + (15/16)(V_{30}^2/2g)$  o bi

$$18,9 V_{30} + 0,048 V_{30}^3 = 72,2$$

Resolviendo esta ecuación por tanteos:

Tanteo 1.º  $V_{30} = 3,5$  m/seg,

Tanteo 2.º  $V_{30} = 4,0$  m/seg,

Tanteo 3.º  $V_{30} = 3,7$  m/seg,

$$66,2 + 2,10 \neq 72,2 \text{ (debe aumentarse } V)$$

$$75,6 + 3,07 \neq 72,2 \text{ (solución entre ambas)}$$

$$70,0 + 2,43 = 72,2 \text{ (solución)}$$

El caudal  $Q = A_{30}V_{30} = \frac{1}{4}\pi(0,3)^2 \times 3,7 = 0,262 \text{ m}^3/\text{seg.}$

- 31.** Un aceite, de densidad relativa 0,761, está fluyendo desde el depósito *A* al *E*, según se muestra en la Fig. 6-14. Las distintas pérdidas de carga pueden suponerse vienen dadas como sigue:

$$\text{de } A \text{ a } B = 0,60 \frac{V_{30}^2}{2g} \quad \text{de } C \text{ a } D = 0,40 \frac{V_{15}^2}{2g}$$

$$\text{de } B \text{ a } C = 9,0 \frac{V_{30}^2}{2g} \quad \text{de } D \text{ a } E = 9,0 \frac{V_{15}^2}{2g}$$

Determinar (a) el caudal  $Q$  en m<sup>3</sup>/seg,

(b) la presión en *C* en kg/cm<sup>2</sup> y

(c) la potencia en *C*, en CV, tomando como plano de referencia el que pasa por *E*.

**Solución:**

(a) Aplicando la ecuación de la energía entre *A* y *E*, plano de referencia el que pasa por *E*,

$$\begin{aligned} & \text{en } A \quad \text{de } A \text{ a } B \quad \text{de } B \text{ a } C \quad \text{de } C \text{ a } D \quad \text{de } D \text{ a } E \quad \text{en } E \\ & (0 + \text{despr.} + 40,0) - \left[ \left( 0,60 \frac{V_{30}^2}{2g} + 9,0 \frac{V_{30}^2}{2g} \right) + \left( 0,40 \frac{V_{15}^2}{2g} + 9,0 \frac{V_{15}^2}{2g} \right) \right] = (0 + \text{despr.} + 0) \end{aligned}$$

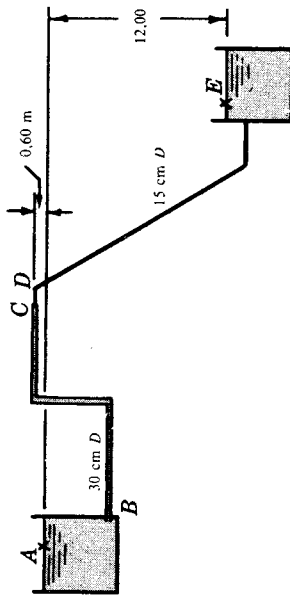


Fig. 6-14

o bien  $12,0 = 9,6(V_{30}^2/2g) + 9,4(V_{15}^2/2g)$ . Además,  $V_{30}^2 = (\frac{1}{2})^4 V_{15}^2 = \frac{1}{16} V_{15}^2$ . Sustituyendo y despejando,  $V_{15}^2/2g = 1,2$  m,  $V_{15} = 4,85$  m/seg y  $Q = \frac{1}{4}\pi(0,15)^2 \times 4,85 = 0,086$  m<sup>3</sup>/seg

(b) Aplicando la ecuación de la energía entre  $A$  y  $C$ , plano de referencia el que pasa por  $A$ ,

$$(0 + \text{despr.} + 0) - (0,60 + 9,0) \frac{p_c}{w} = \frac{p_c}{w} + \frac{V_{30}^2}{2g} + 0,60 \quad \text{y} \quad \frac{V_{30}^2}{2g} = \frac{1}{16} \frac{V_{15}^2}{2g} = \frac{1}{16} (1,2) = 0,075 \text{ m}$$

Por tanto,  $p_c/w = -1,395$  m de aceite (man) y  $p'_c = (0,761 \times 1000)(-1,395)/10^4 = -0,106$  kg/cm<sup>2</sup> (man).

Los mismos resultados podrían haberse obtenido también aplicando la ecuación de Bernoulli entre  $C$  y  $E$ . Las dos ecuaciones obtenidas por los dos caminos *no* constituirían, naturalmente, un sistema de ecuaciones independientes.

(c) Potencia en  $C = \frac{wQH_C}{75} = \frac{(0,761 \times 1000)(0,086)(-1,395 + 0,075 + 12,6)}{75} = 9,85$  CV, plano de referencia el que pasa por  $E$ .

32. La carga extraída por la turbina  $CR$  de la Fig. 6-15 es de 60 m y la presión en  $T$  es de  $5,10$  kg/cm<sup>2</sup>. Para unas pérdidas entre  $W$  y  $R$  de  $2,0(V_{30}^2/2g)$  y de  $3,0(V_{30}^2/2g)$  entre  $C$  y  $T$ , determinar (a) el caudal de agua que circula y (b) la altura de presión en  $R$ . Dibujar la línea de alturas totales.

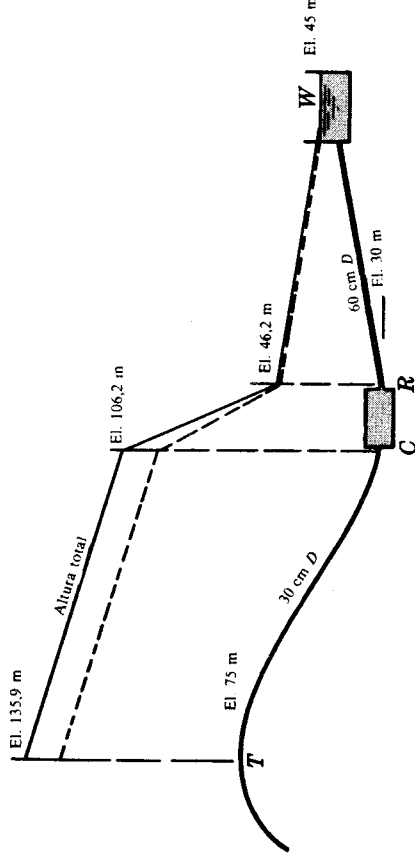


Fig. 6-15

### Solución:

Como la elevación de la línea de alturas totales en  $T$  es igual a  $(75 + \frac{5,10 \times 10^4}{1000} + \frac{V_{30}^2}{2g})$  muy por encima de la elevación en  $W$ , el agua circulará hacia el recipiente  $W$ .

(a) Aplicando la ecuación de la energía entre  $T$  y  $W$ , tomando como plano de referencia el de cota cero,

$$\left( \frac{5,10 \times 10^4}{1000} + \frac{V_{30}^2}{2g} + 75 \right) - \left[ 3,0 \frac{V_{30}^2}{2g} + 2,0 \frac{V_{30}^2}{2g} \right] - 60 = (0 + \text{despr.} + 45)$$

en  $T$                       de  $T$  a  $C$     de  $R$  a  $W$      $H_T$                       en  $W$

Sustituyendo  $V_{60}^2 = \frac{1}{16} V_{30}^2$  y operando,  $V_{30}^2/2g = 9,88$  m, de donde  $V_{30} = 13,9$  m/seg. Por tanto,  $Q = \frac{1}{4}\pi(0,3)^2 \times 13,9 = 0,98$  m<sup>3</sup>/seg

(b) Aplicando la ecuación de la energía entre  $R$  y  $W$ , con plano de referencia el que pasa por  $R$ ,  $(p_R/w + \frac{1}{16} \times 9,88 + 0) - 2(\frac{1}{16} \times 9,88) = (0 + \text{despr.} + 15) + p_R/w = 15,62$  m. El lector puede comprobar esta altura de presión aplicando la ecuación de Bernoulli entre  $T$  y  $R$ .

Para dibujar la línea de alturas totales se calcula la altura total en las secciones indicadas.

$$\begin{aligned} \text{Altura total en } T &= 51,0 + 9,9 + 75,0 = 135,9 \text{ m} \\ \text{en } C &= 135,9 - 3 \times 9,9 = 106,2 \text{ m} \\ \text{en } R &= 106,2 - 60,0 = 46,2 \text{ m} \\ \text{en } W &= 46,2 - 2 \times \frac{1}{16} \times 9,9 = 45,0 \text{ m} \end{aligned}$$

En los siguientes capítulos se demostrará que la línea de alturas totales es una línea recta en el caso de flujo permanente en una tubería de diámetro constante. La línea de alturas piezométricas será paralela a la línea de alturas totales y situada por debajo de ella a una distancia igual a  $V^2/2g$ , altura de velocidad (la figura dibujada a trazos).

33. (a) ¿Cuál es la presión en la ojiva de un torpedo que se mueve en agua salada a 30 m/seg y a una profundidad de 9,0 m? (b) Si la presión en un punto lateral  $C$  del torpedo, y a la misma profundidad, que la ojiva, es de 0,70 kg/cm<sup>2</sup> (man), ¿cuál es la velocidad relativa en ese punto?

**Solución:**

(a) En este caso se obtiene una mayor claridad, en la aplicación de la ecuación de Bernoulli, al considerar torpedo en reposo y sumergido en una corriente de agua a la misma velocidad relativa que en el caso real. La velocidad en la punta anterior del torpedo será ahora cero. Suponiendo que no hay pérdida de carga en un tubo de corriente que vaya desde un punto  $A$ , delante del torpedo y a suficiente distancia para que el flujo no esté perturbado, y un punto  $B$ , situado en la punta de la ojiva del torpedo, la ecuación de Bernoulli toma la forma

$$\left(\frac{p_A}{w} + z_A\right) - 0 = \left(\frac{p_B}{w} + z_B\right) + \frac{V_B^2}{2g} \quad \text{o bien} \quad (9,0 + \frac{(30)^2}{2g} + 0) = \left(\frac{p_B}{w} + 0 + 0\right)$$

Por tanto,  $p_B/w = 55$  m de agua de mar, y  $p'_B = wh/10^4 = 1025(55)/10^4 = 5,65$  kg/cm<sup>2</sup> (man).

Esta presión se llama presión de estancamiento (también presión de parada o de remanso) y puede expresarse en la forma  $p_S = p_0 + \frac{1}{2}\rho V_0^2$ , en kg/m<sup>2</sup>. Para un estudio más detallado, véase Capítulos 9 y 1.

- (b) Se puede aplicar la ecuación de Bernoulli entre los puntos  $A$  y  $C$  o bien entre  $B$  y  $C$ . Escogiendo  $A$  y  $C$

$$\left(\frac{p_A}{w} + \frac{V_A^2}{2g} + z_A\right) - 0 = \left(\frac{p_C}{w} + \frac{V_C^2}{2g} + z_C\right) \quad \text{o bien} \quad (9,0 + \frac{(30)^2}{2g} + 0) = \left(\frac{0,70 \times 10^4}{1025} + \frac{V_C^2}{2g} + 0\right)$$

de la cual  $V_C = 30,7$  m/seg.

34. Una esfera está colocada en una corriente de aire, donde reina la presión atmosférica, y que se mueve a una velocidad de 30,0 m/seg. Suponiendo que no hay variación en la densidad del aire y que ésta es igual a 0,125 UTM/m<sup>3</sup>, (a) calcular la presión de estancamiento y (b) calcular la presión sobre un punto de la superficie de la esfera, punto  $B$ , a 75° del punto de estancamiento, si la velocidad en dicho punto es de 66,0 m/seg.

**Solución:**

- (a) Aplicando la fórmula dada en el problema anterior se obtiene

$$p_S = p_0 + \frac{1}{2}\rho V_0^2 = 1,033(10^4) + \frac{1}{2}(0,125)(30,0)^2 = 10.330 + 56,25 = 10.386 \text{ kg/m}^2$$

- (b) Peso específico del aire =  $\rho g = 0,125(9,8) = 1,225$  kg/m<sup>3</sup>.

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre el punto de estancamiento y el  $B$ , se obtiene

$$\left(\frac{p_S}{w} + \frac{V_S^2}{2g} + 0\right) - 0 = \left(\frac{p_B}{w} + \frac{V_B^2}{2g} + 0\right) \quad \text{o bien} \quad \left(\frac{10.386}{1,225} + 0 + 0\right) = \left(\frac{p_B}{w} + \frac{(66,0)^2}{2g} + 0\right)$$

de donde  $p_B/w = 8238$  m de aire, y  $p'_B = wh/10^4 = 1,225(8238)/10^4 = 1,010$  kg/cm<sup>2</sup>.

35. Un gran depósito cerrado está lleno de amoníaco a una presión manométrica de 0,37 kg/cm<sup>2</sup> y a una temperatura de 18° C. El amoníaco descarga en la atmósfera a través de un pequeño orificio practicado en uno de los lados del depósito. Despreciando las pérdidas por fricción, calcular la velocidad con que el amoníaco abandona el depósito (a) suponiendo su densidad constante y (b) suponiendo que el flujo tiene lugar en condiciones adiabáticas.

**Solución:**

(a) Aplicando la ecuación de Bernoulli entre el depósito y la atmósfera,

$$\left(\frac{0,37 \times 10^4}{w_1} + 0 + 0\right) = \left(0 + \frac{V^2}{2g} + 0\right) \quad \text{donde} \quad w_1 = \frac{p_1}{RT} = \frac{(0,37 + 1,030)10^4}{49,6(273 + 18)} = 0,97 \text{ kg/m}^3$$

Sustituyendo y despejando,  $V = 273 \text{ m/seg}$ .

Para un peso específico  $w$  constante puede utilizarse indistintamente la presión manométrica o la absoluta. Sin embargo, cuando  $w$  no es constante *debe* emplearse la carga de presión absoluta.

(b) Para  $V_1 = 0$  y  $z_1 = z_2$ , la ecuación (D), para procesos adiabáticos, del Problema 20 puede escribirse

$$\left(\frac{k}{k-1}\right) \frac{p_1}{w_1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k-1)/k}\right] = \frac{V_2^2}{2g}$$

Para el amoniaco, de la Tabla 1 del Apéndice,  $k = 1,32$  y

$$1,32 \times \frac{1,40 \times 10^4}{0,97} \left[1 - \left(\frac{1,03 \times 10^4}{1,40 \times 10^4}\right)^{0,242}\right] = \frac{V_2^2}{2g} \quad \text{de donde} \quad V_2 = 285 \text{ m/seg}$$

Al utilizar la hipótesis de densidad constante, el error en la velocidad es del 4,2 %, aproximadamente. El peso específico del amoniaco en el chorro se calcula mediante la expresión

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^k \quad \text{o} \quad \frac{1,40}{1,03} = \left(\frac{0,97}{w_2}\right)^{1,32} \quad \text{y} \quad w_2 = 0,774 \text{ kg/m}^3$$

A pesar de esta variación de un 20,3 % en la densidad, el error en la velocidad fue solo de un 4,2 %.

**36.** Comparar las velocidades en los casos (a) y (b) del Problema 35 para una presión en el depósito de  $1,08 \text{ kg/cm}^2$  (man).

**Solución:**

$$(a) \quad w_1 = \frac{p_1}{RT} = \frac{2,11 \times 10^4}{49,6 \times 291} = 1,460 \text{ kg/m}^3 \quad \text{y, a partir del problema anterior,}$$

$$\frac{1,08 \times 10^4}{1,46} = \frac{V^2}{2g} \quad \text{y} \quad V = 380 \text{ m/seg}$$

(b) Mediante la expresión dada en el problema anterior para procesos adiabáticos,

$$\frac{V^2}{2g} = \frac{1,32}{0,32} \times \frac{2,11 \times 10^4}{1,46} \left[1 - \left(\frac{1,03 \times 10^4}{2,11 \times 10^4}\right)^{0,242}\right] = 9410, \quad \text{de donde} \quad V = 430 \text{ m/seg}$$

El error cometido, al suponer la densidad constante, en la velocidad es del 11,6 % aproximadamente. La variación de densidad es del 41 % aproximadamente.

Las limitaciones impuestas en el módulo de la velocidad se discutirán en el Capítulo 11. Se verá que la velocidad límite, para la temperatura considerada, es de  $430 \text{ m/seg}$ .

**37.** Una corriente de nitrógeno está fluyendo desde una tubería de  $5,0 \text{ cm}$ , donde la temperatura es de  $4,5^\circ \text{C}$  y la presión  $2,80 \text{ kg/cm}^2$ , a una tubería de  $2,5 \text{ cm}$  en la que la presión es  $1,50 \text{ kg/cm}^2$ . Las presiones son manométricas. Calcular la velocidad en cada una de las tuberías, suponiendo que no hay pérdidas y aplicando el proceso isotérmico.

**Solución:**

Aplicando la ecuación (C) del Problema 20 para condiciones isotérmicas y despejando  $V_2$ , teniendo en cuenta que  $z_1 = z_2$ ,

$$\frac{V_2^2 \left[ 1 - \left( \frac{A_2 p_2}{A_1 p_1} \right)^2 \right]}{2g} = \frac{p_1}{w_1} \ln \left( \frac{p_1}{p_2} \right) = RT \ln \left( \frac{p_1}{p_2} \right) \quad \text{o} \quad V_2 = \sqrt{2g \times \frac{RT \ln (p_1/p_2)}{1 - (A_2 p_2/A_1 p_1)^2}}$$

Sustituyendo valores, y teniendo en cuenta que  $R = 30,3$  para el nitrógeno, Tabla 1 del Apéndice,

$$V_2 = \sqrt{2g \times \frac{30,3 \times 277,5 \ln (3,83 \times 10^4)/(2,53 \times 10^4)}{1 - (\frac{1}{2})^4 [(2,53 \times 10^4)/(3,83 \times 10^4)]^2}} = 265 \text{ m/seg}$$

$$\text{Además, } V_1 = (A_2/A_1)(p_2/p_1)V_2 = (\frac{1}{2})^2(2,53/3,83)(265) = 43,8 \text{ m/seg.}$$

38. En el Problema 37, siendo la presión, velocidad y temperatura, respectivamente, en la tubería de 5,0 cm, 2,67 kg/cm<sup>2</sup> (man), 43 m/seg y 0° C, calcular la presión y la velocidad en la tubería d 2,5 cm. Se supone que no hay pérdidas y que las condiciones son isotérmicas.

#### Solución:

Utilizando la ecuación (C), para condiciones isotérmicas del Problema 20, poniéndola en función de  $V$  en lugar de  $V_2$ ,

$$(a) \quad \frac{(43)^2}{2g} \left[ 1 - \left( \frac{4}{1} \right)^2 \left( \frac{3,70 \times 10^4}{p'_2 \times 10^4} \right)^2 \right] = 30,3 \times 273 \ln \frac{p'_2 \times 10^4}{3,70 \times 10^4}$$

Aunque solo aparece una incógnita, la solución directa es difícil. Se utiliza el método de aproximaciones sucesivas, dando un valor a  $p'_2$ , que figura en el denominador de la fracción entre corchetes.

- (1) Se supone  $p'_2 = 3,70 \text{ kg/cm}^2$  (ab) y se despeja  $p'_2$  del segundo miembro de la ecuación.

$$94,4[1 - 16(1)^2] = 8272 \ln (p'_2/3,70)$$

de donde  $p'_2 = 3,11 \text{ kg/cm}^2$  (ab).

- (2) Al utilizar el valor  $p'_2 = 3,11 \text{ kg/cm}^2$  en (a) resultaría una nueva desigualdad. Anticipando el resultado, se supone el valor  $p'_2 = 2,45 \text{ kg/cm}^2$ , y se procede como anteriormente.

$$94,4[1 - 16(3,70/2,45)^2] = 8272 \ln (p'_2/3,70)$$

de donde  $p'_2 = 2,44 \text{ kg/cm}^2$  (ab), que puede considerarse como solución operando con regla de cálculo. Para la velocidad,

$$V_2 = \frac{w_1 A_1}{w_2 A_2} V_1 \quad \text{o} \quad V_2 = \frac{p_1 A_1}{p_2 A_2} V_1 = \frac{3,70 \times 10^4}{2,44 \times 10^4} \left( \frac{1}{2} \right)^2 \times 43 = 261 \text{ m/seg}$$

## Problemas propuestos

39. ¿Cuál es la velocidad media en una tubería de 15 cm, si el caudal de agua transportado es de 3800 m<sup>3</sup>/día?  
Sol. 2,48 m/seg

40. ¿Qué diámetro debe de tener una tubería para transportar 2 m<sup>3</sup>/seg a una velocidad media de 3 m/seg?  
Sol. 92 cm

41. Una tubería de 30 cm de diámetro, que transporta 110 l/seg, está conectada a una tubería de 15 cm. Determinar la altura de velocidad en la tubería de 15 cm. Sol. 1,97 m

42. Una tubería de 15 cm de diámetro transporta 80 l/seg. La tubería se ramifica en otras dos, una de 5 cm y la otra de 10 cm de diámetro. Si la velocidad en la tubería de 5 cm es de 12 m/seg, ¿cuál es la velocidad en la tubería de 10 cm? Sol. 7,20 m/seg

43. Determinar si las expresiones siguientes de las componentes de la velocidad satisfacen las condiciones de flujo permanente e incompresible.

$$(a) \quad u = 3xy^2 + 2x + y^2 \\ v = x^2 - 2y - y^3$$

$$(b) \quad u = 2x^2 + 3y^2 \\ v = -3xy$$

Sol. (a) Sí (b) No

44. Una tubería de 30 cm de diámetro transporta aceite, viniendo dada la distribución de velocidades por  $v = 30(\frac{r}{r_0} - r^2)$ . Determinar la velocidad media y el valor del coeficiente de corrección de la energía cinética.  
*Sol.*  $\alpha = 2,00$ ,  $V_{av} = 34$  cm/seg
45. Demostrar que la ecuación de continuidad puede escribirse en la forma  $1 = \frac{1}{A} \int_A \left( \frac{v}{V_{av}} \right) dA$ .
46. Una tubería de 30 cm de diámetro transporta 110 l/seg de un aceite de densidad relativa 0,812 y la presión manométrica en *A* es de 0,20 kg/cm<sup>2</sup>. Si el punto *A* está situado 1,80 m por encima del plano de referencia, calcular la energía en *A* en kgm/kg. *Sol.* 4,27 kgm/kg
47. ¿Cuántos kg/seg de anhídrido carbónico fluyen a través de una tubería de 15 cm de diámetro si la presión manométrica es de 1,75 kg/cm<sup>2</sup>, la temperatura de 27° C y la velocidad media de 2,50 m/seg? *Sol.* 0,213 kg/seg
48. Una tubería de 20 cm de diámetro transporta aire a 24 m/seg, 1,51 kg/cm<sup>2</sup> de presión absoluta y 27° C. ¿Cuál es el caudal de aire en peso que fluye? La tubería de 20 cm se reduce a 10 cm de diámetro y la presión y temperatura en esta última son 1,33 kg/cm<sup>2</sup> (ab) y 11° C, respectivamente. Determinar la velocidad en la tubería de 10 cm y los caudales en m<sup>3</sup>/seg en ambas tuberías.  
*Sol.* 1,29 kg/seg, 103 m<sup>3</sup>/seg, 0,75 m<sup>3</sup>/seg, 0,81 m<sup>3</sup>/seg
49. A través de una tubería de 10 cm está fluyendo aire a una velocidad de 5,00 m/seg. La presión manométrica medida es de 2,00 kg/cm<sup>2</sup> y la temperatura 15° C. En otro punto, aguas abajo, la presión manométrica es 1,40 kg/cm<sup>2</sup> y la temperatura 27° C. Para una lectura barométrica correspondiente a la presión atmosférica normal calcular la velocidad en el punto aguas abajo y los caudales en volumen en ambas secciones.  
*Sol.* 6,54 m/seg, 39,3 l/seg, 51,4 l/seg
50. Anhídrido sulfuroso fluye a través de una tubería de 30 cm de diámetro, que se reduce a 10 cm de diámetro al desaguar en el interior de una chimenea. Las presiones en la tubería y en el chorro que desagua son, respectivamente, 1,40 kg/cm<sup>2</sup> (ab) y la presión atmosférica (1,033 kg/cm<sup>2</sup>). La velocidad en la tubería es de 15,0 m/seg y la temperatura 27° C. Determinar la velocidad en la corriente de desagüe si la temperatura del gas es allí de -5° C.  
*Sol.* 72,5 m/seg
51. A través de una tubería de 15 cm de diámetro fluye agua a una presión de 4,20 kg/cm<sup>2</sup>. Suponiendo que no hay pérdidas, ¿cuál es el caudal si en una reducción de 7,5 cm de diámetro la presión es de 1,40 kg/cm<sup>2</sup>?  
*Sol.*  $Q = 107$  l/seg
52. Si en el Problema 51 fluye un aceite de densidad relativa 0,752, calcular el caudal. *Sol.* 123 l/seg
53. Si lo que fluye en el Problema 51 es tetracloruro de carbono (densidad relativa 1,594), determinar  $Q$ .  
*Sol.* 85 l/seg
54. A través de una tubería vertical de 30 cm de diámetro fluyen hacia arriba 220 l/seg de agua. En el punto *A* de la tubería la presión es 2,20 kg/cm<sup>2</sup>. En el punto *B*, 4,60 m por encima de *A*, el diámetro es de 60 cm y la pérdida de carga entre *A* y *B* es igual a 1,80 m. Determinar la presión en *B* en kg/cm<sup>2</sup>. *Sol.* 1,61 kg/cm<sup>2</sup>
55. Una tubería de 30 cm de diámetro tiene un corto tramo en el que el diámetro se reduce gradualmente hasta 15 cm y de nuevo aumenta a 30 cm. La sección de 15 cm está 60 cm por debajo de la sección *A*, situada en la tubería de 30 cm, donde la presión es de 5,25 kg/cm<sup>2</sup>. Si entre las dos secciones anteriores se conecta un manómetro diferencial de mercurio, ¿cuál es la lectura del manómetro cuando circula hacia abajo un caudal de agua de 120 l/seg? Supóngase que no existen pérdidas. *Sol.* 17,6 cm
56. Una tubería de 30 cm de diámetro transporta aceite de densidad relativa 0,811 a una velocidad de 24 m/seg. En los puntos *A* y *B* las medidas de la presión y elevación fueron, respectivamente, 3,70 kg/cm<sup>2</sup> y 2,96 kg/cm<sup>2</sup> y 30 m y 33 m. Para un flujo permanente, determinar la pérdida de carga entre *A* y *B*. *Sol.* 6,12 m
57. Un chorro de agua, de 7,5 cm de diámetro, descarga en la atmósfera a una velocidad de 24 m/seg. Calcular la potencia, en caballos de vapor del chorro, utilizando como plano de referencia el horizontal que pasa por el eje del chorro. *Sol.* 41,6 CV
58. Un recipiente suministra agua a través de una tubería horizontal de 15 cm de diámetro y 300 m de longitud. El flujo es a tubería llena y desagua en la atmósfera un caudal de 65 l/seg. ¿Cuál es la presión en la mitad de la longitud de la tubería al suponer que la única pérdida de carga es de 6,20 m cada 100 m de tubería?  
*Sol.* 0,93 kg/cm<sup>2</sup>
59. Un aceite de densidad relativa 0,750 es bombeado desde un depósito por encima de una colina a través de una tubería de 60 cm de diámetro, manteniendo una presión en el punto más elevado de la línea de 1,80 kg/cm<sup>2</sup>. La



parte superior de la tubería está 75 m sobre la superficie libre del depósito y el caudal de aceite bombeado de 620 l/seg. Si la pérdida de carga desde el depósito hasta la cima es de 4,70 m, ¿qué potencia debe suministrar la bomba al líquido? *Sol.* 645 CV

60. Una bomba aspira agua de un pozo mediante una tubería vertical de 15 cm. La bomba desagua a través de una tubería horizontal de 10 cm de diámetro, situada 3,20 m sobre el nivel del agua del pozo. Cuando se bombea 35 l/seg. las lecturas de los manómetros colocados a la entrada y a la salida de la bomba son  $-0,32 \text{ kg/cm}^2$  +  $1,80 \text{ kg/cm}^2$ , respectivamente. El manómetro de descarga está situado 1,0 m por encima del manómetro de succión. Calcular la potencia de salida de la bomba y la pérdida de carga en la tubería de succión de 15 cm *Sol.* 10,4 CV, 0,80 m
61. Calcular la pérdida de carga en una tubería de 15 cm de diámetro si es necesario mantener una presión de  $2,3 \text{ kg/cm}^2$  en un punto aguas arriba y situado 1,80 m por debajo de la sección de la tubería por la que desagua a la atmósfera  $55 \text{ l/seg}$  de agua. *Sol.* 21,70 m
62. Un depósito cerrado de grandes dimensiones está parcialmente lleno de agua, y el espacio superior con aire presión. Una manguera de 5 cm de diámetro, conectada al depósito, desagua sobre la azotea de un edificio, 15 m por encima de la superficie libre del agua del depósito. Las pérdidas por fricción son de 5,50 m. ¿Qué presión de aire debe mantenerse en el depósito para desaguar sobre la azotea un caudal de 12 l/seg? *Sol.* 2,24 kg/cm
63. Mediante una bomba se bombea agua desde un recipiente *A*, a una elevación de 225 m, hasta otro depósito *I* a una elevación de 240 m, a través de una tubería de 30 cm de diámetro. La presión en la tubería de 30 cm es el punto *D*, a una elevación de 195 m, es de  $5,60 \text{ kg/cm}^2$ . Las pérdidas de carga son: de *A* a la entrada de la bomba *B* = 0,60 m, de la salida de la bomba *C* hasta *D* =  $38V^2/2g$  y desde *D* a *E* =  $40V^2/2g$ . Determinar el caudal *Q* y la potencia en CV suministrada por la bomba *BC*. *Sol.* 166 l/seg, 83 CV
64. Un venturímetro horizontal tiene diámetros de 60 y 45 cm en la entrada y garganta, respectivamente. La lectura de un manómetro diferencial de agua es de 10 cm cuando está conectado entre la entrada y la garganta y fluye el aire a través del aparato. Considerando constante e igual a  $1,28 \text{ kg/m}^3$  el peso específico del aire y despreciando la fricción, determinar el caudal en  $\text{m}^3/\text{seg}$ . *Sol.*  $6,66 \text{ m}^3/\text{seg}$
65. Desde un depósito hay que transvasar un caudal de agua de 89 l/seg mediante un sifón. El extremo por el que desagua el sifón ha de estar 4,20 m por debajo de la superficie libre del agua en el depósito. Los términos de pérdida de carga son:  $1,50V^2/2g$  desde el depósito hasta la parte más elevada del sifón y  $1,00V^2/2g$  desde ésta al desague. La parte superior del sifón está 1,50 m por encima de la superficie del agua. Determinar el diámetro de la tubería necesaria y la presión en la parte superior del sifón. *Sol.* 15,3 cm,  $-0,45 \text{ kg/cm}^2$
66. Una tubería horizontal de 60 cm de diámetro transporta 440 l/seg de un aceite de densidad relativa 0,825. Las cuatro bombas instaladas a lo largo de la línea son iguales, es decir, las presiones a la entrada y a la salida son, respectivamente,  $-0,56 \text{ kg/cm}^2$  y  $24,50 \text{ kg/cm}^2$ . Si la pérdida de carga, en las condiciones en que desagua, es de 6,00 m cada 1000 m de tubería, ¿con qué separación deben colocarse las bombas? *Sol.* 50.600 m
67. Un depósito de grandes dimensiones está lleno de aire a una presión manométrica de  $0,40 \text{ kg/cm}^2$  y una temperatura de  $18^\circ \text{C}$ . El aire se descarga en la atmósfera ( $1,030 \text{ kg/cm}^2$ ) a través de un pequeño orificio abierto en uno de los lados del depósito. Despreciando las pérdidas por fricción, calcular la velocidad de salida del aire al suponer (a) densidad constante del aire, (b) condiciones de flujo adiabático. *Sol.* 216 m/seg, 229 m/seg
68. En el Problema 67, cuando la presión sea de  $0,70 \text{ kg/cm}^2$  (man), ¿cuáles serán las velocidades en los casos (a) y (b)? *Sol.* 260 m/seg, 286 m/seg
69. Desde una tubería de 30 mm, donde la presión manométrica es de  $4,20 \text{ kg/cm}^2$  y la temperatura de  $4^\circ \text{C}$ , está fluyendo anhídrido carbónico en el interior de una tubería de 15 mm un caudal en peso de  $0,040 \text{ kg/seg}$ . Despreciando el rozamiento y suponiendo el flujo isotérmico, determinar la presión en la tubería de 15 mm. *Sol.*  $900 \text{ kg/m}^2$  (absoluta)
70. Un soplador de aire ha de proporcionar  $1140 \text{ m}^3/\text{min}$ . Dos manómetros de tubo en U miden las presiones de succión y de descarga. La lectura del manómetro de succión es negativa de 5 cm de agua. El manómetro de descarga, colocado 1,0 m por encima del orificio manométrico de succión, da una lectura de +7,5 cm de agua. Los conductos de descarga y de succión son del mismo diámetro. ¿Qué potencia debe de tener el motor que mueva el soplador si el rendimiento global es del 68 % ( $w = 1,20 \text{ kg/m}^3$  para el aire)? *Sol.* 48,1 CV
71. Se está ensayando una tubería de 30 cm para evaluar las pérdidas de carga. Cuando el caudal de agua es de 180 l/seg, la presión en el punto *A* de la tubería es de  $2,80 \text{ kg/cm}^2$ . Entre el punto *A* y el punto *B*, aguas abajo y 3,0 m más elevado que *A*, se conecta un manómetro diferencial. La lectura manométrica es de 1,0 m, siendo el líquido mercurio e indicando mayor presión en *A*. ¿Cuál es la pérdida de carga entre *A* y *B*? *Sol.* 12,57 m
72. Prandtl ha sugerido que la distribución de velocidades, para flujo turbulento en conductos, viene representada

muy aproximadamente por la expresión  $v = v_{\max}(y/r_o)^{1/7}$ , donde  $r_o$  es el radio de la tubería e  $y$  la distancia medida a partir de la pared. Determinar la expresión de la velocidad media en función de la velocidad en el eje  $v_{\max}$ .

*Sol.*  $V = 0,817v_{\max}$

73. ¿Cuál es el coeficiente de corrección de la energía cinética para la distribución de velocidades del Problema 72? *Sol.*  $\alpha = 1,06$

74. Dos placas planas de grandes dimensiones están separadas 1,0 cm. Demostrar que  $\alpha = 1,43$  si la distribución de velocidades viene representada por  $v = v_{\max}(1 - 6200r^2)$ , donde  $r$  se mide desde el plano medio entre las placas.

75. A través de un conducto de sección variable está fluyendo aire isentrópicamente. Para un flujo permanente, demostrar que la velocidad  $V_2$  en una sección aguas abajo de la sección 1 puede escribirse

$$V_2 = V_1(p_1/p_2)^{1/k}(A_1/A_2) \quad \text{para un conducto de forma cualquiera, y}$$

$$V_2 = V_1(p_1/p_2)^{1/k}(D_1/D_2)^2 \quad \text{para conductos circulares}$$

76. Con referencia a la Fig. 6-16, la presión absoluta en el interior de la tubería en  $S$  no debe ser inferior a 0,24 kg/cm<sup>2</sup>. Despreciando las pérdidas, ¿hasta qué altura sobre la superficie libre  $A$  del agua puede elevarse  $S$ ? *Sol.* 6,73 m

77. La bomba  $B$  comunica una altura de 42,20 m al agua que fluye hacia  $E$ , como se muestra en la Fig. 6-17. Si la presión en  $C$  es de  $-0,15 \text{ kg/cm}^2$  y la pérdida de carga entre  $D$  y  $E$  es  $8,0(V^2/2g)$ , ¿cuál es el caudal? *Sol.* 275 l/seg

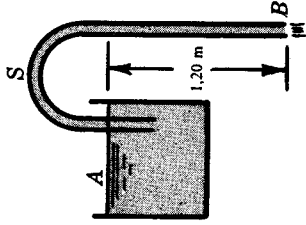


Fig. 6-16

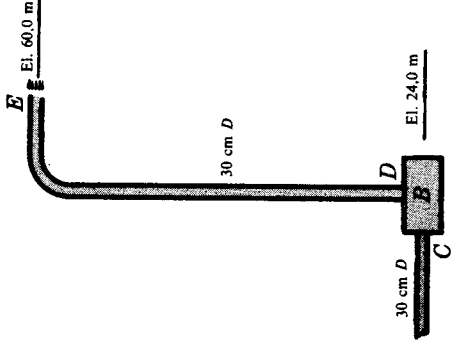


Fig. 6-17

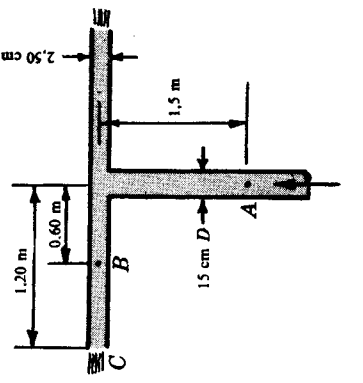


Fig. 6-18

78. El agua fluye radialmente entre dos bridas situadas en el extremo de una tubería de 15 cm de diámetro, como se muestra en la Fig. 6-18. Despreciando las pérdidas, si la altura de presión en  $A$  es  $-0,30 \text{ m}$ , determinar la altura de presión en  $B$  y el caudal en l/seg. *Sol.*  $-0,048 \text{ m}$ , 105,5 l/seg

79. Demostrar que la velocidad media  $V$  en una tubería circular de radio  $r_o$  es igual a  $2v_{\max} \left[ \frac{1}{(K+1)(K+2)} \right]$  para una distribución de velocidades que venga expresada por  $v = v_{\max}(1 - r/r_o)^K$ .

80. Encontrar el coeficiente de corrección de la energía cinética  $\alpha$  para el Problema 79.

$$\text{Sol. } \alpha = \frac{(K+1)^3(K+2)^3}{4(3K+1)(3K+2)}$$

## Flujo de fluidos en tuberías

### INTRODUCCION

Se va a aplicar el principio de la energía a la solución de problemas prácticos de flujos en t que frecuentemente se presentan en las diversas ramas de la ingeniería. El flujo de un fluido real es más complejo que el de un fluido ideal. Debido a la viscosidad de los fluidos reales, en su mov aparecen fuerzas cortantes entre las partículas fluidas y las paredes del contorno y entre las di capas de fluido. Las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que resolverían de forma el problema del flujo (ecuaciones de Euler) no admiten, por lo común, una solución. Como cor cia, los problemas de flujos reales se resuelven aprovechando datos experimentales y utilizand dos semiempíricos.

Existen dos tipos de flujos permanentes en el caso de fluidos reales, que es necesario con y entender. Estos se llaman flujo laminar y flujo turbulento. Ambos tipos de flujos vienen gob por leyes distintas.

### FLUJO LAMINAR

En el flujo laminar las partículas fluidas se mueven según trayectorias paralelas, formando junto de ellas capas o láminas. Los módulos de las velocidades de capas adyacentes no tienen el valor. El flujo laminar está gobernado por la ley que relaciona la tensión cortante con la veloc deformación angular, es decir, la tensión cortante es igual al producto de la viscosidad del fluido gradiente de las velocidades o bien  $\tau = \mu \, dv/dy$  (véase Capítulo 1). La viscosidad del fluido es l nitud física predominante y su acción amortigua cualquier tendencia a la turbulencia.

### VELOCIDAD CRITICA

La velocidad crítica de interés práctico para el ingeniero es aquella velocidad por debajo de toda turbulencia es amortiguada por la acción de la viscosidad del fluido. La experiencia den que un límite superior para el régimen laminar, en tuberías, viene fijado por un valor del núm Reynolds alrededor de 2000, en la mayoría de los casos prácticos.

### NUMERO DE REYNOLDS

El número de Reynolds, que es un grupo adimensional, viene dado por el cociente de las f de inercia por las fuerzas debidas a la viscosidad (véase Capítulo 5 sobre semejanza dinámica Para tuberías circulares, en flujo a tubería llena,

$$\text{Número de Reynolds } R_E = \frac{Vd\rho}{\mu} \quad \text{o} \quad \frac{Vd}{\nu} = \frac{V(2r_o)}{\nu}$$

donde

$V$  = velocidad media en m/seg

$d$  = radio de la tubería en m,  $r_o$  = radio de la tubería en m

$\nu$  = viscosidad cinemática del fluido en  $\text{m}^2/\text{seg}$

$\rho$  = densidad del fluido en  $\text{UTM}/\text{m}^3$  o  $\text{kg seg}^2/\text{m}^4$

$\mu$  = viscosidad absoluta en  $\text{kg seg}/\text{m}^2$

En el caso de conductos de sección recta no circular se utiliza como longitud característic número de Reynolds el radio hidráulico  $R$ , igual al cociente del área de la sección recta por el f tro mojado, expresando el cociente en m. El número de Reynolds es ahora

$$R_E = \frac{V(4R)}{\nu}$$

### FLUJO TURBULENTO

En el flujo turbulento las partículas fluidas se mueven de forma desordenada en todas las di nes. Es imposible conocer la trayectoria de una partícula individualmente.

La tensión cortante en el flujo turbulento puede expresarse así

$$\tau = (\mu + \eta) \frac{dv}{dy} \quad (2a)$$

donde  $\eta$  (eta) = un factor que depende de la densidad del fluido y de las características del movimiento. El primer término entre paréntesis ( $\mu$ ) representa los efectos debidos a la viscosidad y el segundo ( $\eta$ ) tiene en cuenta los efectos debidos a la turbulencia.

Mediante los resultados obtenidos experimentalmente puede obtenerse la solución de las tensiones cortantes en el caso de flujos turbulentos. Prandtl ha sugerido la forma

$$\tau = \rho l^2 \left( \frac{dv}{dy} \right)^2 \quad (2b)$$

para expresar las tensiones cortantes en flujos turbulentos. Esta fórmula tiene el inconveniente de que la longitud de mezcla  $l$  es función de  $y$ . Cuanto mayor es  $y$ , distancia a la pared de la tubería, mayor es el valor de  $l$ . Posteriormente, Von Karman ha sugerido la fórmula

$$\tau = \tau_o \left( 1 - \frac{y}{r_o} \right)^4 = \rho k^2 \frac{(dv/dy)^4}{(d^2v/dy^2)^2} \quad (2c)$$

Aunque  $k$  no es una constante, este número adimensional se mantiene aproximadamente igual a 0,40. La integración de esta expresión conduce a fórmulas del tipo de la (7b), que se da más adelante.

### TENSION CORTANTE EN LA PARED DE UNA TUBERIA

La tensión cortante en la pared de una tubería, como se desarrollará en el Problema 5, es

$$\tau_o = f_\rho V^2/8 \quad \text{en kg/m}^2 \quad (3)$$

donde  $f$  es el coeficiente de fricción, adimensional, que se describe más adelante.

Se demostrará en el Problema 4 que la tensión cortante varía linealmente a lo largo de la sección recta y que

$$\tau = \frac{(p_1 - p_2)}{2L} r \quad \text{o} \quad \tau = \left( \frac{wh_L}{2L} \right) r \quad (4)$$

El término  $\sqrt{\tau_o/\rho}$  se llama velocidad de corte o de fricción y se representa por el símbolo  $v_*$ . A partir de la expresión (3) se obtiene

$$v_* = \sqrt{\tau_o/\rho} = V\sqrt{f/8} \quad (5)$$

### DISTRIBUCION DE VELOCIDADES

La distribución de velocidades en una sección recta seguirá una ley de variación parabólica en el flujo *laminar*. La velocidad máxima tiene lugar en el eje de la tubería y es igual al doble de la velocidad media. La ecuación que da el perfil de velocidades en el flujo laminar (véase Problema 6) puede expresarse como sigue

$$v = v_c - \left( \frac{wh_L}{4\mu L} \right) r^2 \quad (6)$$

En los flujos *turbulentos* resulta una distribución de velocidades más uniforme. A partir de los datos experimentales de Nikuradse y otros investigadores, se dan a continuación las ecuaciones de los perfiles de velocidades en función de la velocidad en el eje de la tubería  $v_c$  o en función de la velocidad de corte  $v_*$ .

(a) Una fórmula experimental es

$$v = v_c (y/r_o)^n \quad (7a)$$

donde  $n = \frac{1}{4}$ , para tuberías lisas, hasta  $R_E = 100.000$   
 $n = \frac{1}{8}$ , para tuberías lisas y  $R_E$  de 100.000 a 400.000

(b) Para tuberías *lisas*,

$$v = v_s(5,5 + 5,75 \log yv_s/v) \quad (7b)$$

Para el término  $yv_s/v$ , véase la parte (e) del Problema 8

(c) Para tuberías *lisas* (y  $5000 < R_E < 3.000.000$ ) y para tuberías rugosas en la zona de exclusiva influencia de la rugosidad,

$$(v_c - v) = -2,5\sqrt{v_o/\rho} \ln y/r_o = -2,5 v_o \ln y/r_o \quad (7c)$$

En función de la velocidad media  $V$ , Vennard ha sugerido que  $V/v_c$  puede escribirse en la forma

$$\frac{V}{v_c} = \frac{1}{1 + 4,07\sqrt{f/8}} \quad (8)$$

(d) Para tuberías *rugosas*,

$$v = v_s(8,5 + 5,75 \log y/\epsilon) \quad (9a)$$

donde  $\epsilon$  es la rugosidad absoluta de la pared de la tubería.

(e) Para contornos *rugosos o lisos*,

$$\frac{v - V}{V\sqrt{f}} = 2 \log y/r_o + 1,32 \quad (9b)$$

También

$$v_c/V = 1,43\sqrt{f} + 1 \quad (9c)$$

### PERDIDA DE CARGA EN FLUJO LAMINAR

En el flujo laminar la pérdida de carga viene dada por la fórmula de Hagen-Poiseuille, que se deducirá en el Problema 6. Su expresión es

$$\begin{aligned} \text{Pérdida de carga (m)} &= \frac{32 \text{ (viscosidad } \mu)(\text{longitud } L \text{ m})(\text{velocidad media } V)}{(\text{peso específico } w)(\text{diámetro } d \text{ m})^2} \\ &= \frac{32 \mu LV}{w d^2} \end{aligned} \quad (10a)$$

En función de la viscosidad cinemática, como  $\mu/w = \nu/g$ , se obtiene

$$\text{Pérdida de carga} = \frac{32 \nu LV}{g d^2} \quad (10b)$$

### FORMULA DE DARCY-WEISBACH

La fórmula de Darcy-Weisbach, desarrollada en el Problema 5 del Capítulo 5, es la fórmula básica para el cálculo de las pérdidas de carga en las tuberías y conductos. La ecuación es la siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Pérdida de carga (m)} &= \text{coeficiente de fricción } f \times \frac{\text{longitud } L \text{ (m)}}{\text{diámetro } d \text{ (m)}} \times \text{altura de velocidad } \frac{V^2}{2g} \\ &= f \frac{L V^2}{d 2g} \end{aligned} \quad (11)$$

Como ya se señaló en el Capítulo 6, la altura de velocidad exacta, en una sección recta, se obtiene dividiendo el cuadrado de la velocidad media  $(Q/A)^2$  por  $2g$  y multiplicando el resultado por un coeficiente  $\alpha$ . En régimen turbulento en tuberías y conductos  $\alpha$  puede considerarse igual a la unidad sin apreciable error en el resultado.

## COEFICIENTE DE FRICCION

El factor o coeficiente de fricción  $f$  puede deducirse matemáticamente en el caso de régimen laminar, mas en el caso de flujo turbulento no se dispone de relaciones matemáticas sencillas para obtener la variación de  $f$  con el número de Reynolds. Todavía más, Nikuradse y otros investigadores han encontrado que sobre el valor de  $f$  también influye la rugosidad relativa de la tubería (igual a la relación de la altura de las imperfecciones superficiales  $\epsilon$  al diámetro interior de la tubería).

(a) Para flujo laminar la ecuación (10b), dada anteriormente, puede ordenarse como sigue:

$$\text{Pérdida de carga} = 64 \frac{\nu}{Vd} \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g} = \frac{64 L}{R_E} \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g} \quad (12a)$$

Por tanto, para régimen laminar en todas las tuberías y para cualquier fluido, el valor de  $f$  viene dado por

$$f = 64/R_E \quad (12b)$$

$R_E$  tiene un valor práctico máximo de 2000 para que el flujo sea laminar.

(b) Para flujo turbulento, muchos ingenieros hidráulicos e investigadores se han esforzado en el cálculo de  $f$ , tanto a partir de sus propios resultados como de los resultados obtenidos por otros investigadores.

(1) Para flujo turbulento en tuberías rugosas o lisas las leyes de resistencia universales pueden deducirse a partir de

$$f = 8\tau_o/\rho \dot{V}^2 = 8V_o^2/V^2 \quad (13)$$

(2) Para tuberías lisas, Blasius ha sugerido, con el número de Reynolds comprendido entre 3000 y 100.000,

$$f = 0,316/R_E^{0,25} \quad (14)$$

Para valores de  $R_E$  hasta 3.000.000, aproximadamente, la ecuación de Von Karman, modificada por Prandtl, es

$$1/\sqrt{f} = 2 \log (R_E \sqrt{f}) - 0,8 \quad (15)$$

(3) Para tuberías rugosas,

$$1/\sqrt{f} = 2 \log r_o/\epsilon + 1,74 \quad (16)$$

(4) Para todas las tuberías, el Hydraulic Institute de los Estados Unidos de Norteamérica y la mayoría de los ingenieros consideran la ecuación de Colebrook como la más aceptable para calcular  $f$ . La ecuación es

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \frac{\epsilon}{3,7d} + \frac{2,51}{R_E \sqrt{f}} \right] \quad (17)$$

Aunque la ecuación (17) es de resolución muy engorrosa, se dispone de diagramas que dan las relaciones existentes entre el coeficiente de fricción  $f$ , el número de Reynolds  $R_E$  y la rugosidad relativa  $\epsilon/d$ . De estos diagramas se incluyen dos en el Apéndice. El Diagrama A-1 (Diagrama de Moody, publicado por cortesía de la American Society of Mechanical Engineers) se utiliza normalmente cuando se conoce  $Q$ , y el Diagrama A-2 se utiliza cuando se desea calcular el caudal. La última forma fue sugerida primeramente por S. P. Johnson y por Hunter Rouse.

Se observa que para tuberías lisas, en las que el valor de  $\epsilon/d$  es muy pequeño, puede desprejarse el primer término entre corchetes de (17); en este caso las (17) y (15) son análogas. Del mismo modo, para números de Reynolds  $R_E$  muy elevados, el segundo término entre corchetes de la (17) es despreciable; en tales casos la viscosidad no influye prácticamente y  $f$  depende tan solo de la rugosidad relativa de la tubería. Este hecho se pone de manifiesto en el Diagrama A-1 ya que las curvas se vuelven horizontales para números de Reynolds elevados.

Antes de utilizar los diagramas, el ingeniero ha de poder estimar la rugosidad relativa de la tubería a partir de su propia experiencia y/o de la de los demás. Los valores sugeridos para el tamaño de las imperfecciones superficiales  $\epsilon$ , en el caso de tuberías nuevas, se incluyen los Diagramas A-1 y A-2.

## OTRAS PERDIDAS DE CARGA

Otras pérdidas de carga, tales como las que tienen lugar en los accesorios de tuberías, se dan generalmente en la forma

$$\text{Pérdida de carga (m)} = K(V^2/2g) \quad (18)$$

En las Tablas 4 y 5 del Apéndice se da una serie de valores de las pérdidas de carga en los accesorios más comúnmente utilizados.

## Problemas resueltos

- Determinar la velocidad crítica para (a) un fuel-oil medio que fluye a  $15^\circ\text{C}$  a través de una tubería de 15 cm de diámetro y (b) el agua a  $15^\circ\text{C}$  que circula por una tubería de 15 cm.

**Solución:**

(a) Para que el flujo sea laminar, el máximo número de Reynolds es 2000. De la Tabla 2 del Apéndice, la viscosidad cinemática a  $15^\circ\text{C}$  es  $4,42 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}$ .

$$2000 = R_E = V_C d / \nu = V_C (0,15) / (4,42 \times 10^{-6}) \quad V_C = 0,059 \text{ m/seg}$$

(b) De la Tabla 2,  $\nu = 1,13 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}$ , para el agua a  $15^\circ\text{C}$ .

$$2000 = V_C (0,15) / (1,13 \times 10^{-6}) \quad V_C = 0,015 \text{ m/seg}$$

- Determinar el tipo de flujo que tiene lugar en una tubería de 30 cm cuando (a) fluye agua a  $15^\circ\text{C}$  a una velocidad de 1,00 m/seg y (b) fluye un fuel-oil pesado a  $15^\circ\text{C}$  y a la misma velocidad.

**Solución:**

(a)  $R_E = Vd/\nu = 1,00(0,3)/(1,13 \times 10^{-6}) = 265.000 > 2000$ . El flujo es turbulento.

(b) De la Tabla 2 del Apéndice,  $\nu = 2,06 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{seg}$ .

$$R_E = Vd/\nu = 1,00(0,3)/(2,06 \times 10^{-4}) = 1450 < 2000. \text{ El flujo es laminar.}$$

- Para un flujo en régimen laminar, ¿qué diámetro de tubería será necesario para transportar 350 l/min de un fuel-oil medio a  $4,5^\circ\text{C}$ ? ( $\nu = 7,00 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}$ ).

**Solución:**

$$Q = 0,350/60 = 5,83 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{seg}. \quad V = Q/A = 4Q/\pi d^2 = 23,33 \times 10^{-3}/\pi d^2 \text{ m/seg.}$$

$$R_E = \frac{Vd}{\nu}, \quad 2000 = \frac{23,33 \times 10^{-3}}{\pi d^2} \left( \frac{d}{7,00 \times 10^{-6}} \right), \quad d = 0,530 \text{ m. Se utilizará la tubería normalizada de diámetro inmediato superior.}$$

- Determinar la distribución de las tensiones cortantes a lo largo de una sección recta de una tubería circular, horizontal y el flujo en régimen permanente.

**Solución:**

(a) Para el cuerpo libre de la Fig. 7-1(a), como el flujo es permanente, cada una de las partículas se mueve hacia la derecha sin aceleración. Por tanto, la suma de todas las fuerzas en la dirección  $x$  debe ser nula.

$$p_1(\pi r^2) - p_2(\pi r^2) - \tau(2\pi r L) = 0 \quad \text{ó} \quad \tau = \frac{(p_1 - p_2)r}{2L} \quad (A)$$

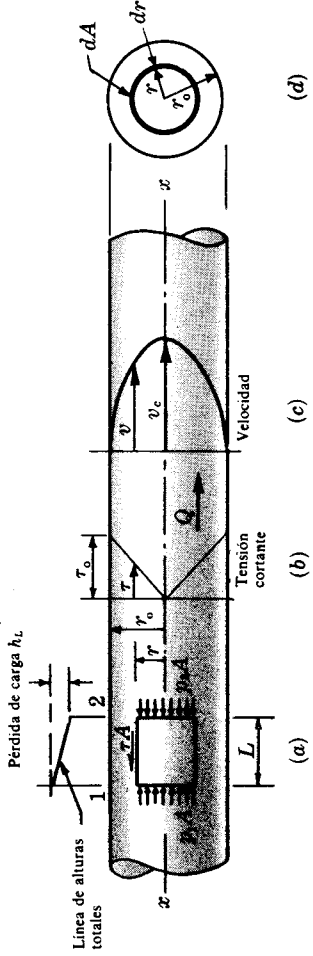


Fig. 7-1

Cuando  $r = 0$ , la tensión cortante  $\tau$  se anula; cuando  $r = r_0$ , la tensión sobre la pared coincide con el máximo de la tensión. La variación es lineal, tal como se ha representado en la Fig. 7-1(b). La ecuación (A) es válida tanto para flujo laminar como turbulento ya que en la deducción de la misma no se ha impuesto limitación alguna respecto al tipo de flujo.

Como  $(p_1 - p_2)/w$  representa la caída de la línea de alturas totales, o pérdida de carga  $h_L$ , multiplicando la ecuación (A) por  $w/w$ , se obtiene

$$\tau = \frac{wr}{2L} \left( \frac{p_1 - p_2}{w} \right) \quad \text{o} \quad \tau = \frac{wh_L}{2L} r \quad (B)$$

5. Desarrollar una expresión que dé la tensión cortante en la pared de una tubería.

**Solución:**

Del Problema 4,  $h_L = \frac{2\tau_0 L}{w r_0} = \frac{4\tau_0 L}{w d}$ . La fórmula de Darcy-Weisbach es  $h_L = f \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g}$ .

Iguando estas expresiones,  $\frac{4\tau_0 L}{w d} = f \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g}$  y  $\tau_0 = f \frac{w}{g} \frac{V^2}{8} = f \rho \frac{V^2}{8}$  en  $\text{kg/m}^2$ .

6. Para un flujo laminar y permanente (a) ¿cuál es la relación entre la velocidad en un punto de la sección recta y la velocidad en el eje de la tubería? y (b) ¿cuál es la ecuación de la distribución de las velocidades?

**Solución:**

(a) En el caso de flujo laminar la tensión cortante (véase Cap. 1) es  $\tau = -\mu(dw/dr)$ . Igualando éste con el valor dado para  $\tau$  por la ecuación (A) del Problema 4, se obtiene

$$-\mu \frac{dv}{dr} = \frac{(p_1 - p_2)r}{2L}$$

Como  $(p_1 - p_2)/L$  no es función de  $r$ ,

$$\begin{aligned} -\int_{v_c}^v dv &= \frac{p_1 - p_2}{2\mu L} \int_0^r r dr & \text{y} & \quad -(v - v_c) = \frac{(p_1 - p_2)r^2}{4\mu L} \\ \text{o} & & v &= v_c - \frac{(p_1 - p_2)r^2}{4\mu L} \end{aligned} \quad (A)$$

Pero la pérdida de carga en  $L$  m de tubería es  $h_L = (p_1 - p_2)/w$ ; por tanto,

$$v = v_c - \frac{wh_L r^2}{4\mu L} \quad (B) \quad \text{y} \quad (C)$$

(b) Como la velocidad en el contorno es cero, cuando  $r = r_0$ ,  $v = 0$  en (A), y se tiene

$$v_c = \frac{(p_1 - p_2)r_0^2}{4\mu L} \quad (\text{en el eje}) \quad (C)$$

Por tanto, en general,  $v = \frac{p_1 - p_2}{4\mu L} (r_0^2 - r^2)$  (D)



7. Desarrollar una expresión para la pérdida de carga en una tubería para el caso de flujo laminar permanente y fluido incompresible. Referirse a la Fig. 7-1(d) del Problema 4.

**Solución:**

$$V_{av} = \frac{Q}{A} = \frac{\int v \, dA}{\int dA} = \frac{\int_0^R v(2\pi r \, dr)}{\pi r_o^2} = \frac{2\pi(p_1 - p_2)}{\pi r_o^2(4\mu L)} \int_0^{r_o} (r_o^2 - r^2) r \, dr \quad (A)$$

de la cual

$$V_{av} = \frac{(p_1 - p_2)r_o^2}{8\mu L}$$

Por tanto, para un flujo laminar la velocidad media es la mitad de la velocidad máxima  $v_o$ , dada por la ecuación (C) del Problema 6. Volviendo a ordenar (A), se obtiene

$$\frac{p_1 - p_2}{w} = \text{pérdida de carga} = \frac{8\mu L V_{av}}{w r_o^2} = \frac{32\mu L V_{av}}{w d^2} \quad (E)$$

Estas expresiones son aplicables al caso de *flujo laminar de cualquier fluido y para todas las tuberías y conductos*. Como ya se estableció al principio de este capítulo, la expresión de la pérdida de carga para flujo laminar es la forma de Darcy es

$$\text{pérdida de carga} = \frac{64}{Re} \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g} = f \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g}$$

8. Determinar (a) la tensión cortante en la pared de una tubería de 30 cm de diámetro si el líquido que fluye es agua y la pérdida de carga medida en 100 m de tubería es de 5,0 m, (b) la tensión cortante a 5 cm del eje de la tubería, (c) la velocidad de corte, (d) la velocidad media para un valor de  $f$  igual a 0,050, (e) la relación  $v/v_*$ .

**Solución:**

(a) Utilizando la ecuación (B) del Problema 4, para  $r = r_o$ , la tensión cortante en la pared será

$$\tau_o = w h_L r_o / 2L = 1000(5)(0,15)/200 = 3,75 \text{ kg/m}^2 = 3,75 \times 10^{-4} \text{ kg/cm}^2$$

(b) Como  $\tau$  varía linealmente desde el eje a la pared,  $\tau = \frac{5}{15}(3,75 \times 10^{-4}) = 1,25 \times 10^{-4} \text{ kg/cm}^2$ .

(c) Por la ecuación (5),  $v_* = \sqrt{\tau_o/\rho} = \sqrt{3,75/102} = 0,191 \text{ m/seg.}$

(d) Mediante  $h_L = f \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g}$ , se tiene  $5 = 0,050 \frac{100}{0,30} \frac{V^2}{2g}$ , de donde  $V = 2,93 \text{ m/seg.}$

De otra forma: De la ecuación (3),  $\tau_o = f \rho V^2 / 8$ ,  $3,75 = 0,050(102)V^2/8$ , de donde  $V = 2,93 \text{ m/seg.}$

(e) De  $\tau_o = \mu(v/y)$  y  $v = \mu/\rho$  se obtiene  $\tau_o = \rho v(v/y)$  o  $\tau_o/\rho = v(v/y)$ .

Como  $\tau_o/\rho = v_*^2$ , se tiene  $v_*^2 = v(v/y)$ ,  $v/v_*^2 = y/v$  y  $v/v_* = v_*/v$ .

9. Si en el problema precedente el agua circula a través de un conducto rectangular de 90 cm por 120 cm de la misma longitud y con la misma pérdida de carga, ¿cuál es la tensión cortante entre el agua y la pared del conducto?

**Solución:**

En el caso de conductos no circulares se utiliza como dimensión lineal conveniente el radio hidráulico. Para una tubería circular,

$$\text{Radio hidráulico } R = \frac{\text{área de la sección recta}}{\text{perímetro mojado}} = \frac{\pi d^2/4}{\pi d} = \frac{d}{4} = \frac{r_o}{2}$$

Sustituyendo  $r = 2R$  en la ecuación (B) del Problema 4,

$$\tau = \frac{w h_L}{L} R = \frac{1000(5)}{100} \cdot \frac{(0,9 \times 1,2)}{2(0,9 + 1,2)} = 12,85 \text{ kg/m}^2 = 1,285 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^2$$

10. Un aceite lubricante medio, de densidad relativa 0.860, es bombeado a través de una tubería horizontal de 5,0 cm de diámetro y 300 m de longitud. El caudal bombeado es de 1,20 l/seg. Si la caída de presión es de 2,10 kg/cm<sup>2</sup>, ¿cuál es la viscosidad absoluta del aceite?

**Solución:**

Suponiendo el flujo laminar y utilizando la expresión (B) del Problema 7, se obtiene

$$(p_1 - p_2) = \frac{32\mu L V_{av}}{d^2}, \quad \text{donde} \quad V_{av} = \frac{Q}{A} = \frac{1.2 \times 10^{-3}}{\frac{1}{4}\pi(0.05)^2} = 0.61 \text{ m/seg}$$

Por tanto,  $2.1 \times 10^4 = 32\mu(300)(0.61)/(0.05)^2$  y  $\mu = 0.00896 \text{ kg seg/m}^2$

Para comprobar la hipótesis hecha al principio de flujo laminar es necesario calcular el valor del número de Reynolds para las condiciones en que se desarrolla el flujo. Así

$$R_E = \frac{Vd}{\nu} = \frac{Vd\mu}{\mu g} = \frac{0.61 \times 0.05 \times 0.860 \times 1000}{0.00896 \times 9.8} = 300$$

Como el número de Reynolds es menor de 2000, el flujo es laminar y el valor hallado de  $\mu$  es correcto.

11. Un caudal de 44 l/seg de un aceite de viscosidad absoluta 0.0103 kg seg/m<sup>2</sup> y densidad relativa 0.850 está circulando por una tubería de 30 cm de diámetro y 3000 m de longitud. ¿Cuál es la pérdida de carga en la tubería?

**Solución:**

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{44 \times 10^{-3}}{\frac{1}{4}\pi(0.3)^2} = 0.62 \text{ m/seg y } R_E = \frac{Vd\mu}{\mu g} = \frac{0.62 \times 0.3 \times 0.850 \times 1000}{0.0103 \times 9.8} = 1565, \text{ lo que significa}$$

que el flujo es laminar. De aquí

$$f = \frac{64}{R_E} = 0.0409 \quad \text{y} \quad \text{pérdida de carga} = f \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g} = 0.0409 \times \frac{3000}{0.3} \times \frac{(0.62)^2}{2g} = 8.02 \text{ m}$$

12. Del punto A al B está fluyendo un fuel-oil pesado a través de una tubería de acero horizontal de 900 m de longitud y 15 cm de diámetro. La presión en A es de 11,0 kg/cm<sup>2</sup> y en B de 0,35 kg/cm<sup>2</sup>. La viscosidad cinemática es  $4,13 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{seg}$  y la densidad relativa 0,918. ¿Cuál es el caudal en l/seg?

**Solución:**

La ecuación de Bernoulli entre A y B, plano de referencia el horizontal que pasa por A, es

$$\left( \frac{11,0 \times 10^4}{0,918 \times 1000} + \frac{V_A^2}{2g} + 0 \right) - f \frac{900}{0,15} \frac{V_{15}^2}{2g} = \left( \frac{0,35 \times 10^4}{0,918 \times 1000} + \frac{V_B^2}{2g} + 0 \right)$$

$$116 = f(6000)(V_{15}^2/2g)$$

o bien

Tanto  $V$  como  $f$  son incógnitas que dependen una de otra. Si el flujo es laminar, por la ecuación (B) del Problema 7,

$$V_{av} = \frac{(p_1 - p_2)d^2}{32\mu L} = \frac{(11,0 - 0,35)(10^4) \times (0,15)^2}{32(4,13 \times 10^{-4} \times 0,918 \times 1000/9.8)(900)} = 2,16 \text{ m/seg}$$

y  $R_E = 2,16(0,15)/(4,13 \times 10^{-4}) = 785$ , por lo que el flujo es laminar. Por tanto,  $Q = A_{15}V_{15} = \frac{1}{4}\pi(0,15)^2 \times 2,16 = 3,8 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{seg} = 38 \text{ l/seg}$ .

Si el flujo hubiera sido turbulento no podría aplicarse la ecuación (B) del Problema 7. En el Problema 15 se utilizará otro método. Todavía más, si entre los puntos A y B existiera una diferencia de cota topográfica o elevación habría que sustituir el término  $(p_1 - p_2)$  de la ecuación (B) por la caída en la línea de alturas piezométricas, medida en kg/m<sup>2</sup>.

13. ¿Qué diámetro de tubería será necesario utilizar para transportar 22,0 l/seg de un fuel-oil pesado a 15° C si la pérdida de carga de que se dispone en 1000 m de longitud de tubería horizontal es de 22,0 m?

**Solución:**

Para el fuel-oil,  $\nu = 2,05 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{seg}$  y la densidad relativa = 0,912. Como el valor de la viscosidad cinemática es muy elevado, se supondrá que el flujo es laminar. Entonces,

$$\text{Pérdida de carga} = \frac{V_{av} \times 32\mu L}{w d^2} \quad \text{y} \quad V_{av} = \frac{Q}{A} = \frac{22 \times 10^{-3}}{\frac{1}{4}\pi d^2} = \frac{0.028}{d^2}$$

$$\text{Sustituyendo,} \quad 22.0 = \frac{(0.028 \, d^2)(32)(2.05 \times 10^{-4} \times 0.912 \times 1000)(9.8)(1000)}{(0.912 \times 1000)d^2}, \quad d = 0.17 \, \text{m.}$$

Se comprueba ahora la hipótesis de flujo laminar utilizando  $d = 0.17 \, \text{m}$ .

$$R_E = \frac{Vd}{\nu} = \frac{(0.028/d^2)d}{\nu} = \frac{0.028}{0.17 \times 2.05 \times 10^{-4}} = 804, \quad \text{luego el flujo es laminar.}$$

Se utilizará tubería normalizada de 8 pulgadas o de 20 cm.

14. Determinar la pérdida de carga en un tramo de tubería nueva de fundición sin recubrimiento de 30 cm de diámetro interior y 1000 m de longitud, cuando (a) fluye agua a  $15^\circ \text{C}$  y a una velocidad de 1.50 m/seg, y (b) cuando circula un fuel-oil medio a  $15^\circ \text{C}$  y a la misma velocidad.

**Solución:**

(a) Para utilizar el Diagrama A-1 es necesario conocer la rugosidad relativa y calcular el valor del número de Reynolds. A partir de la tabla dada en el Diagrama A-1 se ve que los valores de las rugosidades, para tuberías de fundición sin recubrimiento, van de 0.012 cm a 0.060 cm. Para un diámetro interior de 30 cm tomando como valor del diseño  $\epsilon = 0.024 \, \text{cm}$ , la rugosidad relativa será  $\epsilon/d = 0.024/30 = 0.0008$ .

Tomando el valor de la viscosidad cinemática de la Tabla 2 del Apéndice,

$$R_E = Vd/\nu = 1.50(0.3)/(1.13 \times 10^{-6}) = 3.98 \times 10^5 \quad (\text{flujo turbulento})$$

En el Diagrama A-1, para  $\epsilon/d = 0.0008$  y  $R_E = 3.98 \times 10^5$ ,  $f = 0.0194$  y

$$\text{Pérdida de carga} = 0.0194(1000/0.3)(2.25/2g) = 7.40 \, \text{m}$$

O, mediante la Tabla 3 del Apéndice (aplicable al agua solamente),  $f = 0.0200$  y

$$\text{Pérdida de carga} = f(L/d)(V^2/2g) = 0.0200(1000/0.3)(2.25/2g) = 7.65 \, \text{m}$$

- (b) Para el fuel-oil, mediante la Tabla 2,  $R_E = 1.5(0.3)/(4.42 \times 10^{-6}) = 1.02 \times 10^5$ . Para flujo turbulento del Diagrama A-1,  $f = 0.0215$  y pérdida de carga =  $0.0215(1000/0.3)(2.25/2g) = 8.20 \, \text{m}$ .

En general, el valor de la rugosidad de las tuberías en servicio no puede estimarse con gran precisión y, por tanto, en estos casos no es necesario un valor de  $f$  muy preciso. Por las razones dichas, cuando se utilicen los Diagramas A-1 y A-2 y la Tabla 3 para superficies que no sean nuevas, se sugiere que la tercera cifra significativa del valor de  $f$  se lea o interpole solo tomando los valores *cero o cinco*, ya que no puede garantizarse una precisión mayor en la mayoría de los casos prácticos.

Para flujo laminar, y cualquier tubería o fluido, debe utilizarse  $f = 64/R_E$ .

15. Los puntos A y B están unidos por una tubería nueva de acero de 15 cm de diámetro interior y 1200 m de longitud. El punto B está situado 15.0 m por encima del A y las presiones en A y B son respectivamente,  $8.60 \, \text{kg/cm}^2$  y  $3.40 \, \text{kg/cm}^2$ . ¿Qué caudal de un fuel-oil medio a  $21^\circ \text{C}$  circulará entre A y B? (Del Diagrama A-1,  $\epsilon = 0.006 \, \text{cm}$ .)

**Solución:**

El valor del número de Reynolds no puede calcularse directamente. Al establecer la ecuación de Bernoulli entre A y B, tomando como plano de referencia el horizontal que pasa por A,

$$\left( \frac{8.6 \times 10^4}{0.854 \times 1000} + \frac{V_{15}^2}{2g} + 0 \right) - f \left( \frac{1200}{0.15} \right) \frac{V_{15}^2}{2g} = \left( \frac{3.4 \times 10^4}{0.854 \times 1000} + \frac{V_{15}^2}{2g} + 15.0 \right) \quad \text{y} \quad \frac{V_{15}^2}{2g} = \frac{45.8}{8000f}$$

Además,  $R_E = Vd/\nu$ . Sustituyendo  $V$  por el valor anterior,

$$R_E = \frac{d}{\nu} \sqrt{\frac{2g(45.8)}{8000f}} \quad \text{o} \quad R_E \sqrt{f} = \frac{d}{\nu} \sqrt{\frac{2g(45.8)}{8000}} \quad (A)$$

Como el término 45.8 es  $h_L$  o descenso de la línea de alturas piezométricas, y 8000 representa  $L/d$ , la expresión general que ha de utilizarse cuando se quiere determinar  $Q$  es

$$R_E \sqrt{f} = \frac{d}{\nu} \sqrt{\frac{2g(d)/(h_L)}{L}} \quad (\text{véase también Diagrama A-2}) \quad (B)$$

Por tanto, 
$$R_E \sqrt{f} = \frac{0,15}{3,83 \times 10^{-6}} \sqrt{\frac{19,6 \times 45,8}{8000}} = 1,314 \times 10^4$$

La observación del Diagrama A-2 indica que el flujo es turbulento. Entonces, del Diagrama A-2,  $f = 0,020$  para  $\epsilon/d = 0,006/15 = 0,0004$ . Se completa la solución mediante la ecuación de Bernoulli anterior

$$\frac{V_{15}^2}{2g} = \frac{45,8}{8000(0,020)} = 0,286, \quad V_{15} = 2,37 \text{ m/seg} \quad y$$

$$Q = A_{15} V_{15} = \frac{1}{4} \pi (0,15)^2 \times 2,37 = 0,042 \text{ m}^3/\text{seg de fuel-oil}$$

El lector puede comprobar el resultado calculando el valor del número de Reynolds y determinando el valor de  $f$  a partir del Diagrama A-1.

Cuando el flujo es laminar, se seguirá el método desarrollado en el Problema 12.

## 16. ¿Qué caudal de agua (a 15° C) circularía en las condiciones del Problema 15? Utilizar la Tabla 3.

**Solución:**

La ecuación de Bernoulli conduce a  $(86 - 49) = 8000f \frac{V_{15}^2}{2g}, \quad \frac{V_{15}^2}{2g} = \frac{37}{8000f}$ .

La solución más directa es suponer, en este caso, un valor de  $f$ . De la Tabla 3, para tubería nueva de 15 cm,  $f$  varía entre 0,0275 y 0,0175. Se ensaya el valor  $f = 0,0225$ . Entonces,

$$V_{15}^2/2g = 37/(8000 \times 0,0225) = 0,206 \text{ m} \quad y \quad V_{15} = 2,01 \text{ m/seg}$$

Se comprueba ahora tanto el tipo de flujo como el valor de  $f$  en la Tabla 3:

$$R_E = 2,01(0,15)/(1,13 \times 10^{-6}) = 266.000, \quad \text{luego el flujo es turbulento}$$

Ahora, por interpolación en la Tabla 3,  $f = 0,0210$ . Al repetir los cálculos

$$V_{15}^2/2g = 37/(8000 \times 0,0210) = 0,221 \text{ m} \quad y \quad V_{15} = 2,08 \text{ m/seg}$$

De la Tabla 3, y con una precisión razonable,  $f = 0,0210$  (comprobación). De aquí

$$Q = A_{15} V_{15} = \frac{1}{4} \pi (0,15)^2 \times 2,08 = 37 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{seg de agua}$$

Este procedimiento puede utilizarse también con el Diagrama A-1, pero se prefiere el método utilizado en el Problema 15.

## 17. ¿Qué caudal de aire a 20° C puede transportarse mediante una tubería de acero nueva y horizontal de 5 cm de diámetro interior a una presión absoluta de 3 atmósferas y con una pérdida de presión de $3,50 \times 10^{-2} \text{ kg/cm}^2$ en 100 m de tubería? Utilizar $\epsilon = 0,0075 \text{ cm}$ .

**Solución:**

Del Apéndice, para una temperatura de 20° C,  $w = 1,20 \text{ kg/m}^3$  y  $v = 1,49 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{seg}$  a la presión atmosférica normal. A 3 atmósferas,  $w = 3 \times 1,20 = 3,60 \text{ kg/m}^3$  y  $v = \frac{1}{3} \times 1,49 \times 10^{-5} = 4,97 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{seg}$ . Esta viscosidad cinemática podría haberse obtenido también de la siguiente forma

$$\mu = \frac{w}{g} v = \frac{1,20 \times 1,49 \times 10^{-5}}{9,8} = 1,82 \times 10^{-6} \frac{\text{kg seg}}{\text{m}^2} \text{ a } 20^\circ \text{ C y } 1,033 \text{ kg/cm}^2 \text{ de presión absoluta}$$

Además, a  $3 \times 1,033 \text{ kg/cm}^2$  de presión absoluta,  $w_{\text{aire}} = 3,60 \text{ kg/m}^3$  y

$$v \text{ a } 3 \text{ at} = \mu \frac{g}{w} = 1,82 \times 10^{-6} \times \frac{9,8}{3,6} = 4,97 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{seg}$$

Para determinar el caudal puede considerarse el aire como incompresible. Por tanto,

$$\frac{p_1 - p_2}{w} = \text{pérdida de carga} = f \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g}, \quad \frac{0,035 \times 10^4}{3,60} = 97,3 = f \frac{100}{0,05} \frac{V^2}{2g} \quad y \quad \frac{V^2}{2g} = \frac{0,0487}{f}$$

$$\text{También, del Problema 15, } R_E \sqrt{f} = \frac{d}{v} \sqrt{\frac{2g(d)(h_L)}{L}} = \frac{0,05}{4,97 \times 10^{-6}} \sqrt{\frac{19,6(0,05)(97,3)}{100}} = 10.400 \text{ (turbulento).}$$

Del Diagrama A-2,  $f = 0,025$  para  $\epsilon/d = 0,0075/5 = 0,0015$ . De aquí,

$$V^2/2g = 0,0487/f = 1,948 \text{ m}, \quad V_5 = 6,18 \text{ m/seg}, \quad \text{y} \quad Q = A_5 V_5 = \frac{1}{4}\pi(0,05)^2 \times 6,18 = 12,15 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{seg}$$

- 18.** ¿Qué diámetro debe de tener una tubería nueva de fundición de 2400 m de longitud para transportar  $1,0 \text{ m}^3/\text{seg}$  de agua con una caída en la línea de alturas piezométricas de 64 m? Utilizar en los cálculos la Tabla 3.

**Solución:** El teorema de Bernoulli da  $\left(\frac{p_A}{w} + z_A\right) - f \frac{2400}{d} \frac{V^2}{2g} = \left(\frac{p_B}{w} + z_B\right)$

$$\text{o} \quad \left[ \left(\frac{p_A}{w} + z_A\right) - \left(\frac{p_B}{w} + z_B\right) \right] = f \frac{2400}{d} \frac{V^2}{2g}$$

El miembro de la izquierda, entre corchetes, representa la caída de la línea de alturas piezométricas. Sustituyendo  $V = Q/A$  y suponiendo el flujo turbulento

$$64 = f \frac{2400}{d} \frac{(1,0/\frac{1}{4}\pi d^2)^2}{2g}, \quad \text{que simplificada da} \quad d^5 = 3,10f$$

Suponiendo  $f = 0,020$  (como tanto  $d$  como  $V$  son desconocidos, es necesaria una hipótesis). De aquí,

$$d^5 = f(3,10) = 0,020(3,10) = 0,062, \quad d = 0,573 \text{ m}$$

De la Tabla 3, para  $V = \frac{1,0}{\pi(0,573)^2/4} = 3,87 \text{ m/seg}$ ,  $f = 0,0165$ .

Para este valor de la velocidad del agua el flujo es turbulento en la mayoría de las tuberías. Repitiendo los cálculos,

$$d^5 = 0,0165(3,10) = 0,0511, \quad d = 0,552 \text{ m}$$

Se comprueba el valor de  $f$ ,  $V = 4,17 \text{ m/seg}$  y la Tabla 3 da  $f = 0,0165$  (correcto).

Se seleccionará el diámetro normal inmediato superior: 60 cm o 24 pulgadas, para la tubería. (Es necesario comprobar el valor de  $R_E$ , utilizando el valor de  $v$  para el agua a  $21^\circ \text{ C}$ .)

- 19.** Los puntos  $C$  y  $D$ , con la misma elevación, están unidos por una tubería de 150 m de longitud y 20 cm de diámetro y conectados a un manómetro diferencial mediante dos tubos de pequeño diámetro. Cuando el caudal de agua que circula es de  $178 \text{ l/seg}$ , la lectura en el manómetro de mercurio es de 193 cm. Determinar el factor o coeficiente de fricción  $f$ .

**Solución:**

$$\left(\frac{p_C}{w} + \frac{V_{20}^2}{2g} + 0\right) - f \frac{150}{0,20} \frac{V_{20}^2}{2g} = \left(\frac{p_D}{w} + \frac{V_{20}^2}{2g} + 0\right) \quad \text{o} \quad \left(\frac{p_C}{w} - \frac{p_D}{w}\right) = f(750) \frac{V_{20}^2}{2g} \quad (1)$$

Del manómetro diferencial (véase Capítulo 1),  $p_L = p_R$  o

$$p_C/w + 1,93 = p_D/w + 13,57(1,93), \quad \text{y} \quad (p_C/w - p_D/w) = 24,3 \text{ m} \quad (2)$$

Igualando (1) y (2),  $24,3 = f(750)(5,66)^2/2g$  de la cual  $f = 0,0198$ .

- 20.** Un fuel-oil medio a  $15^\circ \text{ C}$  se bombea al depósito  $C$  (véase Fig. 7-2) a través de 1800 m de una tubería nueva de acero roblonado de 40 cm de diámetro interior. La presión en  $A$  es de  $0,14 \text{ kg/cm}^2$ , cuando el caudal es de  $197 \text{ l/seg}$ . (a) ¿Qué potencia debe suministrar la bomba a la corriente de fuel-oil? y (b) ¿qué presión debe mantenerse en  $B$ ? Dibujar la línea de alturas piezométricas.

**Solución:**

$$V_{40} = \frac{Q}{A} = \frac{0,197}{\pi(0,4)^2/4} = 1,565 \text{ m/seg} \quad \text{y} \quad R_E = \frac{1,565 \times 0,4}{5,16} \times 10^6 = 121,000$$

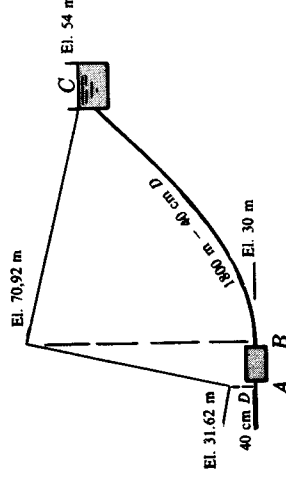


Fig. 7-2

Del Diagrama A-1, para  $\epsilon/d = 0,18/40 = 0,0045$ ,  $f = 0,030$ .

- (a) La ecuación de Bernoulli entre  $A$  y  $C$ , con plano de referencia el horizontal que pasa por  $A$ , da
- $$\left( \frac{0,14 \times 10^4}{0,861 \times 1000} + \frac{(1,565)^2}{2g} + 0 \right) + H_p - 0,03 \left( \frac{1800 (1,565)^2}{0,40} \right) \frac{1}{2g} - \frac{(1,565)^2}{2g} = (0 + 0 + 24)$$

De donde,  $H_p = 39,3$  m y potencia (CV) =  $\frac{wQH_p}{75} = \frac{0,861 \times 1000 \times 0,197 \times 39,3}{75} = 88$  CV.

El último término del primer miembro de la ecuación de la energía representa la pérdida de carga en la sección de desagüe de la tubería en el depósito (véase Tabla 4 del Apéndice). En la práctica, cuando la relación de longitud a diámetro ( $L/d$ ) es superior a 2000 se desprecian las alturas de velocidad y las pérdidas menores en la ecuación de la energía (en el caso presente se eliminan entre sí). La precisión de los resultados obtenidos al tener en cuenta las pérdidas menores es ficticia ya que  $f$  no se conoce con ese grado de precisión.

- (b) La altura de presión en  $B$  puede determinarse estableciendo la ecuación de la energía entre  $A$  y  $B$  o entre  $B$  y  $C$ . En el primer caso los cálculos son más reducidos; así

$$(1,62 + \frac{V_{20}^2}{2g} + 0) + 39,3 = (\frac{p_B}{w} + \frac{V_{40}^2}{2g} + 0)$$

Por tanto,  $p_B/w = 40,92$  m y  $p_B = wh/10^4 = (0,861 \times 1000)(40,92)/10^4 = 3,52$  kg/cm<sup>2</sup>.

La línea de alturas piezométricas aparece dibujada en la Figura 7-2.

En  $A$ ,  $(30,0 + 1,62)$  m = 31,62 m

En  $B$ ,  $(30,0 + 40,92)$  m = 70,92 m (o 31,62 + 39,3)

En  $C$ , elevación = 54 m

21. En el punto  $A$  de una tubería horizontal de 30 cm ( $f = 0,020$ ) la altura de presión es de 60 m. A una distancia de 60 m de  $A$ , la tubería de 30 cm sufre una contracción brusca hasta un diámetro de 15 cm de la nueva tubería. A una distancia de esta contracción brusca de 30 m la tubería de 15 cm ( $f = 0,015$ ) sufre un ensanchamiento brusco, conectándose con una tubería de 30 cm. El punto  $F$  está 30 m aguas abajo de este cambio de sección. Para una velocidad de 2,41 m/seg en las tuberías de 30 cm, dibujar la línea de alturas piezométricas. Referirse a la Figura 7-3.

#### Solución:

Las alturas de velocidad son  $V_{30}^2/2g = (2,41)^2/2g = 0,30$  m y  $V_{15}^2/2g = 4,80$  m.

La línea de alturas totales cae en la dirección del flujo en cantidades iguales a las pérdidas de carga. La línea de alturas piezométricas está por debajo de la de alturas totales en una cantidad igual a la altura de velocidad correspondiente a cada sección. Obsérvese en la Fig. 7-3 que la *línea de alturas piezométricas* puede elevarse cuando tiene lugar un ensanchamiento brusco.

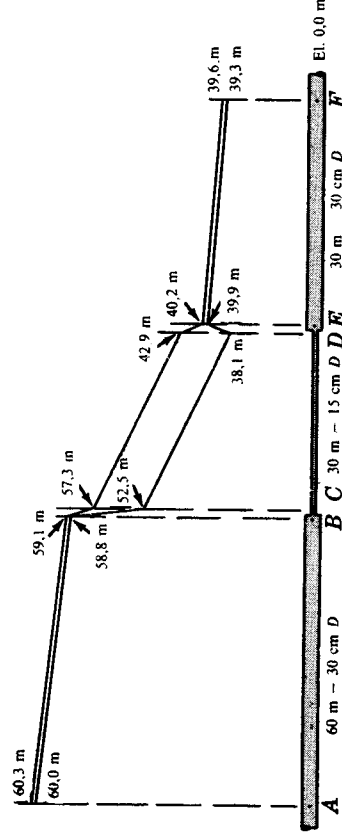


Fig. 7-3

Tabulando los resultados con una aproximación de 0,1 m,

| En | Pérdidas de carga en m |   | Alturas totales, m | $\frac{V^2}{2g}$ m | Alturas piezométricas, m |
|----|------------------------|---|--------------------|--------------------|--------------------------|
|    | Desde                  | Cálculos  |                    |                    |                          |
| A  | (Elev. 0,0)            |   |                    |                    |                          |
| B  | A a B                  | $0,020 \times 60/0,3 \times 0,3 = 1,2$                              | 60,3               | 0,3                | 60,0                     |
| C  | B a C                  | $K_C^* \times 4,8 = 0,37 \times 4,8 = 1,8$                          | 59,1               | 0,3                | 58,8                     |
| D  | C a D                  | $0,015 \times 30/0,15 \times 4,8 = 14,4$                            | 57,3               | 4,8                | 52,5                     |
| E  | D a E                  | $\frac{(V_{15} - V_{30})^2}{2g} = \frac{(9,6 - 2,4)^2}{19,6} = 2,7$ | 42,9               | 4,8                | 38,1                     |
| F  | E a F                  | $0,020 \times 30/0,3 \times 0,3 = 0,6$                              | 40,2               | 0,3                | 39,9                     |
|    |                        |   | 39,6               | 0,3                | 39,3                     |

\* [ $K_C$  se ha obtenido de la Tabla 5; el término correspondiente al ensanchamiento brusco (de D a E) se ha tomado de la Tabla 4.]

- 22.** Está fluyendo un aceite desde el depósito A a través de una tubería nueva de fundición asfaltada de 15 cm y 150 m de longitud hasta el punto B, a una elevación de 30,0 m, como se muestra en la Fig. 7-4. ¿Qué presión, en kg/cm<sup>2</sup>, tendrá que actuar sobre A para que circulen 13,0 l/seg de aceite? ( $D_r = 0,840$  y  $\nu = 2,10 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/seg.) Utilizar  $\epsilon = 0,012$  cm.

**Solución:**

$$V_{15} = \frac{Q}{A} = \frac{13,0 \times 10^{-3}}{1,77 \times 10^{-2}} = 0,735 \text{ m/seg} \quad y \quad R_E = \frac{Vd}{\nu} = \frac{0,735 \times 0,15}{2,10} \times 10^6 = 52.500.$$

Del Diagrama A-1,  $f = 0,0235$  y aplicando la ecuación de Bernoulli entre A y B, con plano de referencia el horizontal que pasa por A, se obtiene

$$\left( \frac{p_A}{w} + 0 + 0 \right) - 0,50 \frac{(0,735)^2}{2g} - 0,0235 \frac{150}{0,15} \frac{(0,735)^2}{2g} = \left( 0 + \frac{(0,735)^2}{2g} + 6 \right)$$

Despejando,  $p_A/w = 6,7$  m de aceite y  $p'_A = wh/10^4 = (0,840 \times 1000)(6,7)/10^4 = 0,56$  kg/cm<sup>2</sup>.

- 23.** La presión en el punto A de una tubería nueva horizontal de fundición, de 10 cm de diámetro interior, es de 3,50 kg/cm<sup>2</sup> (ab), cuando el caudal que circula es de 0,34 kg/seg de aire en condiciones isotérmicas. Calcular la presión que reina en el interior de la tubería en la sección B, situada 540 m aguas abajo de la sección A. (Viscosidad absoluta =  $1,90 \times 10^{-6}$  kg seg/m<sup>2</sup> y  $t = 32^\circ \text{C}$ .) Utilizar  $\epsilon = 0,009$  cm.

**Solución:**

La densidad del aire varía a lo largo del flujo al ir variando la presión.

En el Capítulo 6 se aplicó el teorema de Bernoulli a fluidos compresibles cuando las condiciones no implicaban pérdidas de carga (flujo ideal). La ecuación de la energía, teniendo en cuenta la pérdida de carga, para una longitud de tubería  $dL$  y cuando  $z_1 = z_2$  será

$$\frac{dp}{w} + \frac{V dV}{g} + f \frac{dL}{d} \frac{V^2}{2g} = 0$$

$$\text{Dividiendo por } \frac{V^2}{2g} \quad \frac{2g}{V^2} \frac{dp}{w} + \frac{2 dV}{V} + \frac{f}{d} dL = 0$$

Para un flujo permanente, el número de kg/seg que están fluyendo es constante; por tanto,  $W = wQ = wAV$  y puede sustituirse  $V$  por  $W/wA$  en el término que da la altura de presión, obteniéndose

$$-\frac{2gw^2 A^2}{W^2 w} dp + \frac{2 dV}{V} + \frac{f}{d} dL = 0$$

Como las condiciones son isotérmicas,  $p_1/w_1 = p_2/w_2 = RT$  o bien  $w = p/RT$ . Sustituyendo el valor de  $w$ ,

$$\frac{2gA^2}{W^2RT} \int_{p_1}^{p_2} p \, dp + 2 \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} + \frac{f}{d} \int_{V_1}^{V_2} dL = 0$$

en la que  $f$  puede considerarse constante, como se verá más abajo. Integrando y sustituyendo límites,

$$\frac{gA^2}{W^2RT} (p_2^2 - p_1^2) + 2(\ln V_2 - \ln V_1) + f(L/d) = 0 \quad (A)$$

Para compararla con la forma más común (con  $z_1 = z_2$ ) se pone en la forma

$$(Kp_1^3 + 2 \ln V_1) - f(L/d) = (Kp_2^3 + 2 \ln V_2) \quad (B)$$

donde  $K = \frac{gA^2}{W^2RT}$ . Ordenando términos,

$$p_1^3 - p_2^3 = \frac{W^2RT}{gA^2} \left[ 2 \ln \frac{V_2}{V_1} + f \frac{L}{d} \right] \quad (C)$$

Ahora bien,  $W^2/A^2 = w_1^2 A_1^2 V_1^2 / A_1^2 = w_1^2 V_1^2$  y  $RT = p_1/w_1$ ; de aquí

$$\frac{W^2RT}{gA^2} = \frac{w_1 V_1^2 p_1}{g} \quad (D)$$

Entonces (C) se puede poner

$$(p_1 - p_2) \frac{w_1}{w_1} = \frac{2 \left[ 2 \ln \frac{V_2}{V_1} + f \frac{L}{d} \right] \frac{V_1^2}{2g}}{(1 + p_2/p_1)} = \text{Pérdida de carga} \quad (E)$$

Los límites de las presiones y las velocidades se estudiarán en el Capítulo 11.

Antes de sustituir valores en esta expresión es importante estudiar la posible variación de  $f$  ya que la velocidad  $V$  no se mantiene constante en los gases cuando su densidad varía.

$$R_E = \frac{Vd}{\mu/\rho} = \frac{Vd\rho}{\mu} = \frac{Wd\rho}{wA\mu}. \quad \text{Como } g = \frac{w}{\rho}, \text{ luego } R_E = \frac{Wd}{Ag\mu} \quad (F)$$

Se observará que el número de Reynolds es constante para el flujo permanente ya que  $\mu$  solo varía cuando lo hace la temperatura. De aquí, el coeficiente de rozamiento  $f$  es constante en este problema a pesar de que la velocidad aumentará al disminuir la presión. Sustituyendo valores en (F), utilizando la viscosidad absoluta dada,

$$R_E = \frac{0,34 \times 0,10 \times 10^6}{(\pi/4)(0,10)^2 \times 9,8 \times 1,90} = 232.000. \text{ Del Diagrama A-1, para } \epsilon/d = 0,0009, f = 0,0205.$$

Mediante la (C) anterior, despreciando  $2 \ln V_2/V_1$ , que es muy pequeño comparado al término  $f(L/d)$ ,

$$(3,50 \times 10^4)^2 - p_2^2 = \frac{(0,34)^2 \times 29,3(32 + 273)}{9,8[(\pi/4)(0,10)^2]^2} \left[ \text{desp.} + (0,0205) \frac{540}{0,10} \right]$$

de la cual  $p_2 = 3,22 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$  y  $p_2' = 3,22 \text{ kg/cm}^2$  (ab).

$$\text{En B: } w_2 = \frac{3,22 \times 10^4}{29,3(32 + 273)} = 3,61 \text{ kg/m}^3, \quad V_2 = \frac{W}{w_2 A} = \frac{0,34}{3,61 \times 7,87 \times 10^{-3}} = 12,0 \text{ m/seg.}$$

$$\text{En A: } w_1 = \frac{3,50 \times 10^4}{29,3(32 + 273)} = 3,92 \text{ kg/m}^3, \quad V_1 = \frac{0,34}{3,92 \times 7,87 \times 10^{-3}} = 11,0 \text{ m/seg.}$$

De aquí,  $2 \ln V_2/V_1 = 2 \ln (12,0/11,0) = 2 \times 0,077 = 0,157$ , que es despreciable frente al término  $f(L/d) = 111$ . Por tanto, la presión en la sección B es  $p_2' = 3,22 \text{ kg/cm}^2$ .

Si el aire se supone incompresible, se tiene

$$\frac{p_1 - p_2}{w_1} = f \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g} = 0,0205 \times \frac{540}{0,10} \times \frac{(11,0)^2}{2g} = 687 \text{ m/seg}$$

$$\Delta p = w_1 h = 3,92 \times 687 = 2680 \text{ kg/m}^2 = 0,268 \text{ kg/cm}^2$$

y  $p_2' = 3,50 - 0,27 = 3,23 \text{ kg/cm}^2$ , acuerdo poco frecuente.



24. Una tubería horizontal de hierro forjado, de 15 cm de diámetro interior y algo corroída, transporta 2,00 kg de aire por segundo desde *A* a *B*. En *A* la presión absoluta es 4,90 kg/cm<sup>2</sup> y en *B* debe mantenerse una presión absoluta de 4,60 kg/cm<sup>2</sup>. El flujo es isotérmico a 20° C. ¿Cuál es la longitud de la tubería que une *A* con *B*? Utilizar  $\epsilon = 0,039$  cm.

**Solución:**

Se calculan los valores de partida (véase Apéndice para 20° C y 1,033 kg/cm<sup>2</sup>),

$$w_1 = 1,205(4,90/1,033) = 5,70 \text{ kg/m}^3, \quad w_2 = 1,205(4,60/1,033) = 5,35 \text{ kg/m}^3$$

$$V_1 = \frac{W}{w_1 A} = \frac{2,00}{5,70 \times \frac{1}{4}\pi(0,15)^2} = 19,8 \text{ m/seg}, \quad V_2 = \frac{2,00}{5,35 \times \frac{1}{4}\pi(0,15)^2} = 21,2 \text{ m/seg}$$

$$R_E = \frac{(1,033/4,90)(1,499 \times 10^{-5})}{19,8 \times 0,15} = 943.000. \text{ Del Diagrama A-1, } f = 0,025, \text{ para } \epsilon/d = 0,0026.$$

Mediante la ecuación (*E*) del Problema 23,

$$\frac{(4,90 - 4,60)10^4}{5,70} = \frac{2[2 \ln 21,2/19,8 + 0,025(L/0,15)](19,8)^2/2g}{(1 + 4,60/4,90)} \quad \text{y} \quad L = 152 \text{ m}$$

*Nota:* Para el flujo de gases en tuberías, cuando el valor de  $p_2$  no es menor del 10 % que el valor de  $p_1$ , se comete un error menor del 5 % en la pérdida de presión al utilizar la ecuación de Bernoulli en su forma habitual, suponiendo el fluido como incompresible.

25. Las elevaciones de las líneas de alturas totales y de alturas piezométricas en el punto *G* son, respectivamente, 13,0 m y 12,4 m. Para el sistema mostrado en la Fig. 7-5 calcular (*a*) la potencia extraída entre *G* y *H*, si la altura total en *H* es de 1,0 m y (*b*) las alturas de presión en *E* y *F*, cuya elevación es de 6,0 m. (*c*) Dibujar, con aproximación de 0,1 m, las líneas de alturas totales y de alturas piezométricas, suponiendo para la válvula *CD*  $K = 0,40$  y  $f = 0,010$  para las tuberías de 15 cm.

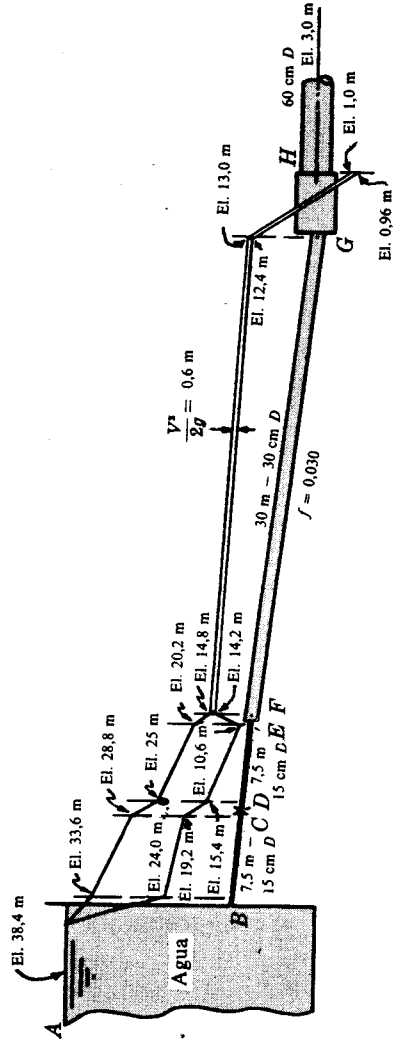


Fig. 7-5

**Solución:**

La corriente debe de circular hacia *G*, desde el depósito, ya que la línea de alturas totales en *G* está por debajo de la superficie libre del depósito. *GH* es una turbina. Antes de poder determinar la potencia extraída es necesario calcular el caudal *Q* y la pérdida de altura en la turbina.

- (*a*) En *G*,  $V_{30}^2/2g = 0,6$  m (diferencia entre las líneas de alturas totales y piezométricas).

Además  $V_{15}^2/2g = 16 \times 0,6 = 9,6$  m y  $V_{60}^2/2g = \frac{1}{16}(0,6) = 0,04$  m. Para obtener *Q*,

$$V_{30} = 3,43 \text{ m/seg} \quad \text{y} \quad Q = \frac{1}{4}\pi(0,3)^2 \times 3,43 = 0,242 \text{ m}^3/\text{seg}$$

Potencia (CV) =  $wQH_T/75 = 1000(0,242)(13,0 - 1,0)/75 = 38,8$  CV extraídos

- (*b*) De *F* a *G*, cota cero: (Energía en *F*) -  $0,030(30/0,3)(0,6) =$  (Energía en *G* = 13,0)

$$\text{Energía en } F = 13,0 + 1,8 = 14,8 \text{ m}$$

De  $E$  a  $F$ , cota cero: (Energía en  $E$ )  $- (13,72 - 3,43)^2/2g =$  (Energía en  $F = 14,8$ )

Energía en  $E = 14,8 + 5,4 = 20,2$  m

$$z + V^2/2g$$

Altura de presión en  $E = 20,2 - (6,0 + 9,6) = 4,6$  m de agua.

Altura de presión en  $F = 14,8 - (6,0 + 0,6) = 8,2$  m de agua.

(c) Yendo hacia atrás desde  $E$ :

Pérdida de altura total de  $D$  a  $E = 0,010(7,5/0,15)(9,6) = 4,8$  m

Pérdida de altura total de  $C$  a  $D = 0,40(9,6) = 3,8$  m

Pérdida de altura total de  $B$  a  $C =$  pérdida de  $D$  a  $E = 4,8$  m

Pérdida de altura total de  $A$  a  $B = 0,50(9,6) = 4,8$  m

(Elev. en  $D - 4,8$ ) = Elev. en  $E = 20,2$ , Elev.  $D = 25,0$  m

(Elev. en  $C - 3,8$ ) = Elev. en  $D = 25,0$ , Elev.  $C = 28,8$  m

(Elev. en  $B - 4,8$ ) = Elev. en  $C = 28,8$ , Elev.  $B = 33,6$  m

(Elev. en  $A - 4,8$ ) = Elev. en  $B = 33,6$ , Elev.  $A = 38,4$  m

La línea de alturas piezométricas está situada por debajo de la línea de alturas totales una cantidad igual a  $V^2/2g$ : 9,6 m en la tubería de 15 cm, 0,6 m en la de 30 cm y 0,04 m en la de 60 cm. Estos valores se han representado en la figura.

Un conducto rectangular usado, de 30 cm  $\times$  45 cm de sección, y 450 m de longitud transporta aire a 20° C y a una presión en la sección de entrada de 1,07 kg/cm<sup>2</sup> (ab) con una velocidad media de 2,90 m/seg. Determinar la pérdida de carga y la caída de presión, suponiendo el conducto horizontal y las imperfecciones superficiales de un tamaño igual a 0,054 cm.

**Solución:**

La fórmula que da la pérdida de carga debe escribirse de forma conveniente para poderla aplicar a conductos de sección recta, no circular. La ecuación resultante se aplica a flujos turbulentos con una precisión razonable. Se sustituye el diámetro, en la fórmula, por el cuádruplo del *radio hidráulico*, que se define por el cociente del área de la sección recta por el perímetro mojado, es decir,  $R = a/p$ .

Para una tubería circular,  $R = \frac{1}{4}\pi d^2/\pi d = d/4$ , y la fórmula de Darcy puede escribirse en la forma

$$\text{Pérdida de carga} = \frac{f}{4} \frac{L}{R} \frac{V^2}{2g}$$

Para  $f$  en relación con la rugosidad del conducto y el número de Reynolds se emplea en lugar de  $d$  el valor  $4R$ , así

$$R_E = Vd/v = V(4R)/v$$

Para el conducto de 30 cm  $\times$  45 cm,  $R = \frac{a}{p} = \frac{0,30 \times 0,45}{2(0,30 + 0,45)} = 0,09$  m . y

$$R_E = \frac{4VR}{v} = \frac{4 \times 2,90 \times 0,09}{(1,033/1,070)(1,499)} \times 10^5 = 72.600$$

Del Diagrama A-1,  $f = 0,024$  para  $\epsilon/d = \epsilon/4R = 0,054/(4 \times 9) = 0,0015$ . Por tanto,

$$\text{Pérdida de carga} = \frac{0,024}{4} \times \frac{450}{0,09} \times \frac{(2,90)^2}{2g} = 12,9 \text{ m de aire}$$

y la caída de presión  $= wh/10^4 = (1,070/1,033)(1,205)(12,9)/10^4 = 1,60 \times 10^{-3}$  kg/cm<sup>2</sup>.

Puede observarse que la hipótesis de densidad constante en el aire es satisfactoria.

## Problemas propuestos

27. Si la tensión cortante en la pared de una tubería de 30 cm es de  $5,0 \text{ kg/m}^2$  y  $f = 0,040$ , ¿cuál es la velocidad media (a) si fluye agua a  $21^\circ \text{C}$ , (b) si fluye un líquido de densidad relativa 0,70?  
*Sol.* 3,13 m/seg, 3,74 m/seg
28. ¿Cuáles son las velocidades de corte en el problema precedente? *Sol.* 0,221 m/seg, 0,264 m/seg
29. A través de una tubería de 15 cm y 60 m de longitud está fluyendo agua y la tensión cortante en las paredes es  $4,60 \text{ kg/m}^2$ . Determinar la pérdida de carga. *Sol.* 7,36 m
30. ¿Qué radio ha de tener una tubería para que la tensión cortante en la pared sea de  $3,12 \text{ kg/m}^2$  cuando al fluir agua a lo largo de 100 m de tubería produce una pérdida de carga de 6 m? *Sol.*  $r = 10,4 \text{ cm}$
31. Calcular la velocidad crítica (inferior) para una tubería de 10 cm que transporta agua a  $27^\circ \text{C}$ .  
*Sol.*  $1,739 \times 10^{-2} \text{ m/seg}$
32. Calcular la velocidad crítica (inferior) para una tubería de 10 cm que transporta un fuel-oil pesado a  $43^\circ \text{C}$ .  
*Sol.* 0,892 m/seg
33. ¿Cuál será la caída de la altura de presión en 100 m de una tubería nueva de fundición, horizontal, de 10 cm de diámetro, que transporta un fuel-oil medio a  $10^\circ \text{C}$ , si la velocidad es de  $7,5 \text{ cm/seg}$ ? *Sol.*  $1,26 \times 10^{-2} \text{ m}$
34. ¿Cuál será la caída de la altura de presión en el Problema 33 si la velocidad del fuel-oil es de  $1,20 \text{ m/seg}$ ?  
*Sol.* 2,20 m
35. Considerando únicamente las pérdidas en la tubería, ¿qué altura de carga se necesita para transportar  $220 \text{ l/seg}$  de un fuel-oil pesado a  $38^\circ \text{C}$  a través de 1000 m de una tubería nueva de fundición de 30 cm de diámetro interior? Utilizar  $\epsilon = 0,024 \text{ cm}$ . *Sol.* 47,70 m
36. En el Problema 35, ¿qué valor mínimo de la viscosidad cinemática del fuel-oil producirá un flujo laminar?  
*Sol.*  $4,67 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{seg}$
37. Al considerar las pérdidas en la tubería únicamente, ¿qué diferencia en la elevación de dos depósitos, que distan 250 m, dará un caudal de  $30 \text{ l/seg}$  de un aceite lubricante medio a  $10^\circ \text{C}$ , a través de una tubería de 15 cm de diámetro? *Sol.* 16,60 m
38. Un aceite de densidad relativa 0,802 y viscosidad cinemática  $1,86 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{seg}$  fluye desde el depósito A al depósito B a través de 300 m de tubería nueva, siendo el caudal de  $88 \text{ l/seg}$ . La altura disponible es de 16 cm. ¿Qué tamaño de tubería deberá utilizarse? *Sol.* 60 cm
39. Mediante una bomba se transporta fuel-oil pesado, a  $15^\circ \text{C}$ , a través de 1000 m de tubería de 5 cm de diámetro hasta un depósito 10 m más elevado que el depósito de alimentación. Despreciando las pérdidas menores, determinar la potencia de la bomba en CV si su rendimiento es del 80 % para un caudal de  $3,5 \text{ l/seg}$ . *Sol.* 78,4 CV
40. Agua a  $38^\circ \text{C}$  está fluyendo entre A y B a través de 250 m de tubería de fundición ( $\epsilon = 0,06 \text{ cm}$ ) de 30 cm de diámetro interior. El punto B está 10 m por encima de A y la presión en B debe mantenerse a  $1,4 \text{ kg/cm}^2$ . Si por la tubería circulan  $220 \text{ l/seg}$ , ¿qué presión ha de existir en A? *Sol.* 3,38 kg/cm<sup>2</sup>
41. Una tubería comercial usada de 100 cm de diámetro interior y 2500 m de longitud, situada horizontalmente, transporta  $1,20 \text{ m}^3/\text{seg}$  de fuel-oil pesado, de densidad relativa 0,912, con una pérdida de carga de  $22,0 \text{ m}$ . ¿Qué presión debe mantenerse en la sección de entrada A para que la presión en B sea de  $1,4 \text{ kg/cm}^2$ ? Utilizar  $\epsilon = 1,37 \text{ cm}$ .  
*Sol.* 3,41 kg/cm<sup>2</sup>
42. Una tubería vieja, de 60 cm de diámetro interior y 1200 m de longitud, transporta un fuel-oil medio a  $27^\circ \text{C}$  desde A a B. Las presiones en A y B son, respectivamente,  $4,0 \text{ kg/cm}^2$  y  $1,4 \text{ kg/cm}^2$ , y el punto B está situado 20 m por encima de A. Calcular el caudal en  $\text{m}^3/\text{seg}$  utilizando  $\epsilon = 0,048 \text{ cm}$ . *Sol.*  $0,65 \text{ m}^3/\text{seg}$
43. Desde un depósito A, cuya superficie libre está a una cota de 25 m, fluye agua hacia otro depósito B, cuya superficie está a una cota de 18 m. Los depósitos están conectados por una tubería de 30 cm de diámetro y 30 m de longitud ( $f = 0,020$ ) seguida por otros 30 m de tubería de 15 cm ( $f = 0,015$ ). Existen dos codos de  $90^\circ$  en cada tubería ( $K = 0,50$  para cada uno de ellos), K para la contracción es igual a 0,75 y la tubería de 30 cm es entran-te en el depósito A. Si la cota de la contracción brusca es de 16 m, determinar la altura de presión en las tuberías de 30 y 15 cm en el cambio de sección. *Sol.* 8,51 m, 5,90 m

44. En la Fig. 7-6 el punto *B* dista 180 m del recipiente. Si circulan 15 l/seg de agua, calcular (a) la pérdida de carga debida a la obstrucción parcial *C* y (b) la presión absoluta en *B*.  
*Sol.* 1,68 m, 0,98 kg/cm<sup>2</sup> (ab)

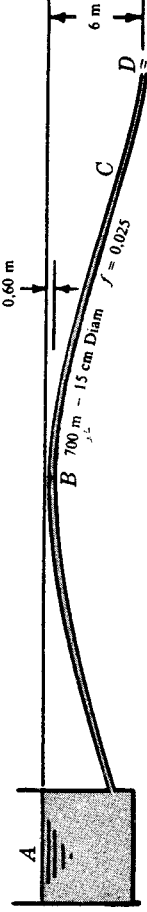


Fig. 7-6

45. Un disolvente comercial a 21° C fluye desde un depósito *A* a otro *B* a través de 150 m de una tubería nueva de fundición asfaltada de 15 cm de diámetro. La diferencia de elevación entre las superficies libres es de 7 m. La tubería es entrante en el depósito *A* y dos codos en la línea producen una pérdida de carga igual a dos veces la altura de velocidad. ¿Cuál es el caudal que tiene lugar? Utilizar  $\epsilon = 0,0135$  cm. *Sol.* 41,6 l/seg
46. Un conducto de acero de sección rectangular de 5 cm  $\times$  10 cm transporta 18 l/seg de agua a una temperatura media de 15° C y a presión constante al hacer que la línea de alturas piezométricas sea paralela al eje del conducto. ¿Qué altura ha de descender el conducto en 100 m al suponer la rugosidad absoluta de la superficie del conducto igual a 0,025 cm? (Utilizar  $\nu = 1,132 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/seg.) *Sol.* 27,8 m

47. Cuando circulan 40 l/seg de un fuel-oil medio a 15° C entre *A* y *B* a través de 1000 m de una tubería nueva de fundición de 15 cm de diámetro, la pérdida de carga es de 40 cm. Las secciones *A* y *B* tienen cotas de 0,0 m y 18,0 m, respectivamente, siendo la presión en *B* de 3,50 kg/cm<sup>2</sup>. ¿Qué presión debe mantenerse en *A* para que tenga lugar el caudal establecido? *Sol.* 8,48 kg/cm<sup>2</sup>

48. (a) Determinar el caudal de agua que circula a través de las tuberías nuevas de fundición mostradas en la Fig. 7-7. (b) ¿Cuál es la presión en *B* si está a 30 m del depósito *A*? (Utilizar la Tabla 3.) *Sol.* 98 l/seg, 703 kg/m<sup>2</sup>

49. A través del sistema mostrado en la Fig. 7-8 fluye agua a 38° C. Las tuberías son nuevas de fundición asfaltada y sus longitudes 50 m la de 7,5 cm y 30 m la de 15 cm. Los coeficientes de pérdida de los accesorios y válvulas son: Codos de 7,5 cm,  $K = 0,40$  cada uno; codo de 15 cm,  $K = 0,60$  y válvula de 15 cm,  $K = 3,0$ . Determinar el caudal. *Sol.* 13,6 l/seg

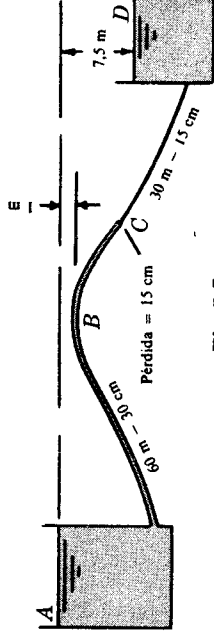


Fig. 7-7

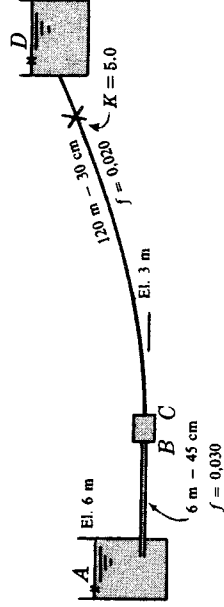


Fig. 7-9

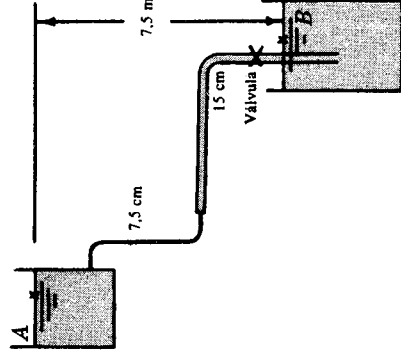


Fig. 7-8

50. Si la bomba *B* de la Fig. 7-9 transfiere al fluido 70 CV cuando el caudal de agua es de 220 l/seg, ¿a qué elevación puede situarse el depósito *D*? *Sol.* 21,0 m

51. Una bomba situada a una cota topográfica de 3 m mueve 210 l/seg de agua a través de un sistema de tuberías horizontales hasta un depósito cerrado, cuya superficie libre está a una cota de 6,0 m. La altura de presión en la sección de succión, de 30 cm de diámetro, de la bomba es de  $-1,20$  m y en la sección de descarga, de 15 cm de diámetro, de 58,0 m. La tubería de 15 cm ( $f = 0,030$ ) tiene 30 m de longitud, sufre un ensanchamiento brusco hasta 30 cm, continuando con una tubería de este diámetro ( $f = 0,020$ ) y una longitud de 180 m hasta el depósito. Una válvula de 30 cm,  $K = 1,0$ , está situada a 30 m del depósito. Determinar la presión sobre la superficie libre del agua del depósito. Dibujar las líneas de alturas totales y piezométricas. *Sol.* 0,88 kg/cm<sup>2</sup>
52. ¿Qué diámetro debe de tener una tubería medio nueva de fundición para transportar 30 l/seg de agua a 21° C a través de 1200 m con una pérdida de altura piezométrica de 20 m? (Utilizar la Tabla 3.) *Sol.* 16,5 m
53. La bomba *BC* transporta agua hasta el depósito *F* y en la Fig. 7-10 se muestra la línea de alturas piezométricas. Determinar (a) la potencia suministrada al agua por la bomba *BC*, (b) la potencia extraída por la turbina *DE* y (c) la cota de la superficie libre mantenida en el depósito *F*. *Sol.* 950 CV, 67,3 CV, 89,6 m

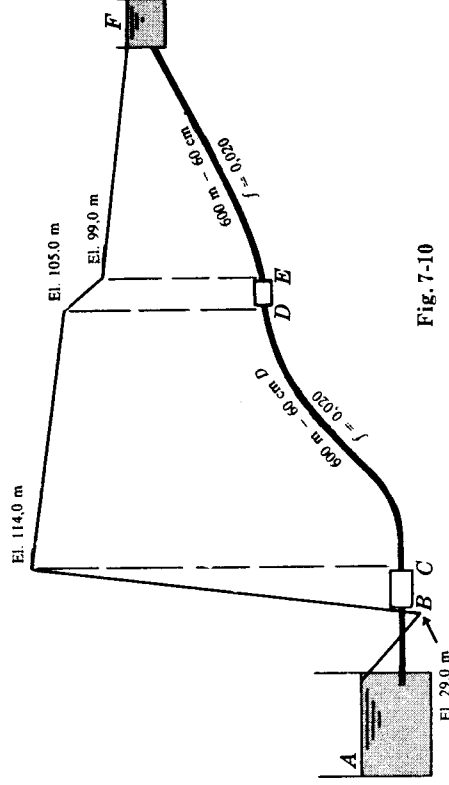


Fig. 7-10

54. A través de una tubería de 5 cm de diámetro circulan 68 g/seg de aire a la temperatura constante de 20° C. La tubería es usada y el material de fundición. En la sección *A* la presión absoluta es de 3,80 kg/cm<sup>2</sup>. ¿Cuál será la presión absoluta 150 m aguas abajo de *A* si la tubería es horizontal? Utilizar  $\epsilon = 0,0249$  cm. *Sol.* 3,68 kg/cm<sup>2</sup> (ab)
55. A través de un tramo horizontal de 60 m de longitud de una tubería nueva de hierro forjado de 10 cm de diámetro fluye anhídrido carbónico a 38° C. La presión manométrica en la sección *A* de aguas arriba es de 8,40 kg/cm<sup>2</sup> y la velocidad media de 12 m/seg. Suponiendo las variaciones de densidad despreciables, ¿cuál es la caída de presión en los 60 m de tubería? (La viscosidad absoluta del CO<sub>2</sub> a 38° C es  $\mu = 16 \times 10^{-7}$  kg seg/m<sup>2</sup>.) *Sol.* 0,123 kg/cm<sup>2</sup>
56. A través de un conducto de sección rectangular de 20 cm de altura tiene lugar un flujo en régimen laminar. Suponiendo que la distribución de velocidades viene dada por la ecuación  $v = 48y(1 - 5y)$ , calcular (a) el caudal por metro de anchura, (b) el coeficiente de corrección de la energía cinética y (c) la relación de la velocidad media a la máxima. *Sol.* 320 l/seg m,  $\alpha = 1,543$ , 0,67
57. En un ensayo de laboratorio se utiliza una tubería de plástico de 25 cm de diámetro interior para demostrar el flujo en régimen laminar. Si la velocidad crítica inferior resultó ser 3,0 m/seg, ¿qué valor tendrá la viscosidad cinemática del líquido utilizado? *Sol.*  $3,75 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/seg
58. Para el flujo laminar en tuberías  $f = 64/R_E$ . Mediante esta información, desarrollar una expresión de la velocidad media en función de la pérdida de carga, diámetro y otras magnitudes oportunas. *Sol.*  $V = g d^2 h_L / 32 \nu L$
59. Determinar el caudal en una tubería de 30 cm de diámetro si la ecuación de la distribución de velocidades es  $v^2 = 70(y - y^2)$ , con el origen de distancias en la pared de la tubería. *Sol.* 126 l/seg

# Capítulo 8

## Sistemas de tuberías equivalentes, compuestas, en paralelo y ramificadas

### SISTEMAS DE TUBERIAS

Los sistemas de tuberías que distribuyen el agua en las ciudades o en grandes plantas industriales pueden ser extremadamente complicados. En este capítulo solo se considerarán unos pocos casos bajo condiciones relativamente sencillas. En la mayoría de los casos, el fluido que circula es el agua, si bien los procedimientos de análisis y resolución pueden aplicarse a otros fluidos. Por lo general, la relación de longitud a diámetro será grande (véase Capítulo 7, Problema 20) y podrán despreciarse las pérdidas menores.

En los Problemas 18, 19 y 20 se presentará el método de Hardy Cross para analizar los flujos en redes de tuberías. Los caudales y caídas de presión en los sistemas de distribución muy extensos de las ciudades pueden analizarse mediante calculadores analógicos.

### SISTEMAS DE TUBERIAS EQUIVALENTES

Una tubería es equivalente a otra tubería, o a un sistema de tuberías, si para una pérdida de carga dada tiene lugar el mismo caudal en la tubería equivalente que en el sistema de tuberías dado. Frecuentemente, es conveniente sustituir un sistema de tuberías complejo por una sola tubería equivalente.

### SISTEMAS DE TUBERIAS COMPUESTAS O EN SERIE, EN PARALELO Y RAMIFICADAS

Un sistema compuesto está constituido por varias tuberías en serie.

Un sistema de tuberías en paralelo está constituido por dos o más tuberías que, partiendo de un punto, vuelven a unirse de nuevo en otro punto, aguas abajo del primero.

Un sistema de tuberías ramificadas está constituido por dos o más tuberías que se ramifican en un punto y no vuelven a unirse aguas abajo otra vez.

### MÉTODOS DE RESOLUCION

Los métodos de resolución implican el establecimiento en número suficiente de un sistema de ecuaciones simultáneas o el empleo de modificaciones especiales de la fórmula de Darcy en las que el coeficiente de fricción depende únicamente de la rugosidad relativa de la tubería. Para el caso del agua (o de otros líquidos de viscosidad parecida), dichas fórmulas han sido obtenidas por Manning, Schoder, Cobey, Hazen-Williams y otros.

### FÓRMULA DE HAZEN-WILLIAMS

En este capítulo se utilizará la fórmula de Hazen-Williams. La resolución se hará con la ayuda del diagrama B del Apéndice, en lugar de utilizar, en la mayoría de los casos, procedimientos algebraicos más laboriosos. La fórmula que da la velocidad es

$$V = 0.8494 C_1 R^{0.63} S^{0.54} \quad (1)$$

donde  $V$  = velocidad en m/seg,  $R$  = radio hidráulico en m,  $S$  = pendiente de la línea de alturas pie-

zométricas y  $C_1$  = coeficiente de la rugosidad relativa de Hazen-Williams. Los valores  $n$  para  $C_1$  se dan en la Tabla 6 del Apéndice.

La relación entre esta fórmula empírica y la de Darcy se da en el Problema 1. La principal de la fórmula de Hazen-Williams es que el coeficiente  $C_1$  depende únicamente de la rugosidad

En el Diagrama *B*, el caudal  $Q$  se expresa en l/seg y en millones de galones por día (mgd) tores de conversión son

$$1 \text{ mgd} = 1,547 \text{ ft}^3/\text{seg} = 43,656 \text{ l/seg}$$

## Problemas resueltos

1. Transformar la fórmula de Hazen-Williams en una del tipo de la de Darcy.

**Solución:**

$$V' = 0,8494 C_1 R^{0,63} S^{0,54}$$

Se tiene  $S = h/L$  y  $R = d/4$  (véase Capítulo 7, Problema 26). Despejando  $h$

$$h^{0,54} = \frac{4^{0,63}}{0,8494} \frac{L^{0,54}}{d^{0,63}} \frac{V'}{C_1}$$

$$\text{o} \quad h = \frac{2g(4)^{1,165}}{(0,8494)^{1,850}} \left(\frac{L}{d}\right)^{\frac{V'^2}{2g}} \left[ \frac{d^{-0,015}}{V'^{0,150} d^{0,150} C_1^{1,850}} \right] = \frac{133,4 d^{-0,015}}{C_1^{1,850}} \left(\frac{L}{d}\right)^{\frac{V'^2}{2g}} \left[ \frac{1}{d^{0,150} V'^{0,150}} \right]$$

Para incluir el número de Reynolds en la ecuación se multiplica por  $(\nu/V)^{0,150}$ , y se obtiene

$$h = \frac{133,4 d^{-0,015}}{C_1^{1,850} \nu^{0,150}} \left(\frac{L}{d}\right)^{\frac{V'^2}{2g}} \left[ \frac{\nu^{0,150}}{V'^{0,150} d^{0,150}} \right] = \frac{133,4 d^{-0,015}}{C_1^{1,850} \nu^{0,150} R_E^{0,150}} \left(\frac{L}{d}\right)^{\frac{V'^2}{2g}} = f_1 \left(\frac{L}{d}\right)^{\frac{V'^2}{2g}}$$

Se observará que si se omite el factor  $d^{-0,015}$ , muy próximo a la unidad, el coeficiente de fricción  $f_1$  únicamente del número de Reynolds y del coeficiente de rugosidad  $C_1$  para todos los líquidos cuya  $\nu$  no varíe apreciablemente (en tanto por ciento) con los cambios de temperatura. En tales casos, se utilizará el medio (o representativo) de la viscosidad, que se supondrá constante en esta fórmula del tipo de la *d*

2. Comparar los resultados obtenidos por resolución algebraica y mediante el Diagrama *B* para caudal que circula por una tubería nueva de 30 cm de diámetro con una pérdida de altura métrica de 4,30 m en 1500 m de tubería y (*b*) la pérdida de carga que tiene lugar en 1800 m tubería vieja de fundición de 60 cm de diámetro, cuando el caudal que circula es de 250 l/s

**Solución:**

$$(a) \text{ Algebraicamente. } S = 4,30/1500 = 0,00287 \quad \text{y} \quad R = d/4 = 7,5 \text{ cm.}$$

De la Tabla 6 del Apéndice,  $C_1 = 130$ . De aquí,

$$Q = AV = \frac{1}{4}\pi(0,30)^2[0,8494 \times 130(0,075)^{0,63}(0,00287)^{0,54}] = 0,061 \text{ m}^3/\text{seg} = 61 \text{ l/seg}$$

**Por el diagrama.** El Diagrama *B* está construido para  $C_1 = 100$ .

$$D = 30 \text{ cm} \quad \text{y} \quad S = 0,00287 \quad \text{o} \quad 2,87 \text{ m/1000 m.}$$

Con estos valores,  $Q_{100} = 48 \text{ l/seg}$  (leyendo el nomograma de acuerdo con las instrucciones que en el mismo).

Al observar la fórmula de Hazen-Williams se ve que  $V$  y  $Q$  son directamente proporcionales a  $C$  el caudal para  $C_1 = 130$  será

$$Q_{130} = (130/100)(48) \text{ l/seg} = 62,3 \text{ l/seg}$$

- (b) **Algebraicamente.** ( $C_1 = 100$ ).  $Q = 250$  l/seg.  
 $0,250 = \frac{1}{4}\pi(0,60)^2[0,8494 \times 100(0,60/4)^{0,63} S^{0,54}]$  y  $S = 0,00195$

**Por el diagrama.**  $Q = 250$  l/seg,  $D = 60$  cm.

$$S = 0,002 \text{ m/1000 m} = 0,002 \text{ (del diagrama).}$$

3. Una tubería usada de 30 cm de diámetro de fundición transporta 100 l/seg de agua. ¿Cuál será la pérdida de altura en 1200 m de tubería (a) mediante la fórmula de Darcy y (b) utilizando la fórmula de Hazen-Williams?

**Solución:**

- (a)  $V_{30} = 0,100/[ \frac{1}{4}\pi(0,30)^2 ] = 1,413$  m/seg. De la Tabla 3 del Apéndice,  $f = 0,0260$ .

$$\text{Pérdida de carga} = f \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g} = 0,0260 \frac{1200}{0,30} \frac{(1,413)^2}{2g} = 10,6 \text{ m}$$

- (b)  $Q = 100$  l/seg y  $C_1 = 110$ .  $Q_{100} = (100/110)100 = 82,8$  l/seg.

Del Diagrama B,  $S = 8,4$  m/1000 m y pérdida de carga  $= 8,4 \times 1,2 = 10,1$  m.

La coincidencia de resultados es notoria.

La experiencia y buen juicio en la elección de  $C_1$  conducirán a resultados satisfactorios para el caso en que circula agua o bien líquidos de viscosidad parecida.

4. Para una pérdida de carga de 5,0 m/1000 m y utilizando  $C_1 = 100$  para todas las conducciones, ¿cuántas tuberías de 20 cm son equivalentes a una de 40 cm?, ¿y a una de 60 cm?

**Solución:**

Mediante el Diagrama B, para  $S = 5,0$  m/1000 m:  $Q$  para tubería de 20 cm = 22 l/seg  
 $Q$  para tubería de 40 cm = 140 l/seg  
 $Q$  para tubería de 60 cm = 380 l/seg

Por tanto, tomamos 140/22 o bien 6,4 tuberías de 20 cm, equivalentes hidráulicamente, a una de 40 cm de la misma rugosidad relativa. Del mismo modo, 380/22 ó 17,3 tuberías de 20 cm son equivalentes a una de 60 cm para una pérdida de carga de 5,0 m/1000 m o para cualesquiera otras condiciones de pérdida de carga.

5. Un sistema de tuberías en serie está constituido por un tramo de 1800 m de tubería de 50 cm, otro de 1200 m de 40 cm y 600 m de 30 cm. Todas las tuberías son nuevas de fundición. Hallar a partir del sistema (a) la longitud equivalente de una tubería de 40 cm y (b) el diámetro equivalente si la longitud de la tubería fuera de 3600 m.

**Solución:**

Utilícese  $C_1 = 130$  para tubería nueva de fundición.

- (a) Como la magnitud hidráulica común para un sistema de tuberías en serie es el caudal, supóngase que éste es de 130 l/seg (cualquier otro valor serviría). Para utilizar el Diagrama B, se cambia  $Q_{130}$  en  $Q_{100}$ , es decir,

$$Q_{100} = (100/130)(130) = 100 \text{ l/seg}$$

$$\begin{array}{llll} S_{50} = 0,93 \text{ m/1000 m y la pérdida de carga} = 0,93 \times 1,8 = 1,675 \text{ m} & (15,0\%) \\ S_{40} = 2,62 \text{ m/1000 m} & \text{pérdida de carga} = 2,62 \times 1,2 = 3,141 \text{ m} & (28,2\%) \\ S_{30} = 10,60 \text{ m/1000 m} & \text{pérdida de carga} = 10,60 \times 0,6 = 6,360 \text{ m} & (56,8\%) \end{array}$$

$$\text{Para } Q = 130 \text{ l/seg: Pérdida de carga total} = 11,176 \text{ m (100,0\%)}$$

La tubería equivalente de 40 cm debe transportar 130 l/seg con una pérdida de carga de 11,176 m ( $C = 130$ ).

$$S_{40} = 2,62 \text{ m/1000 m} = \frac{\text{pérdida de carga en m}}{\text{longitud equivalente en m}} = \frac{11,176}{L_E}$$

$$\text{y } L_E = 4260 \text{ m.}$$



- (b) Los 3600 m de tubería. ( $C_1 = 130$ ), deben transportar 130 l/seg con una pérdida de carga de 11,176 m.

$$S_F = \frac{\text{pérdida de carga en m}}{\text{longitud en m}} = \frac{11,176}{3600} = 3,10 \text{ m/1000 m}$$

Y en el Diagrama B, utilizando  $Q_{100} = 100 \text{ l/seg}$ ,  $D = 38 \text{ cm}$  (aproximadamente).

6. Hallar la longitud equivalente, en tubería de 15 cm, del sistema mostrado en la Figura 8-1.

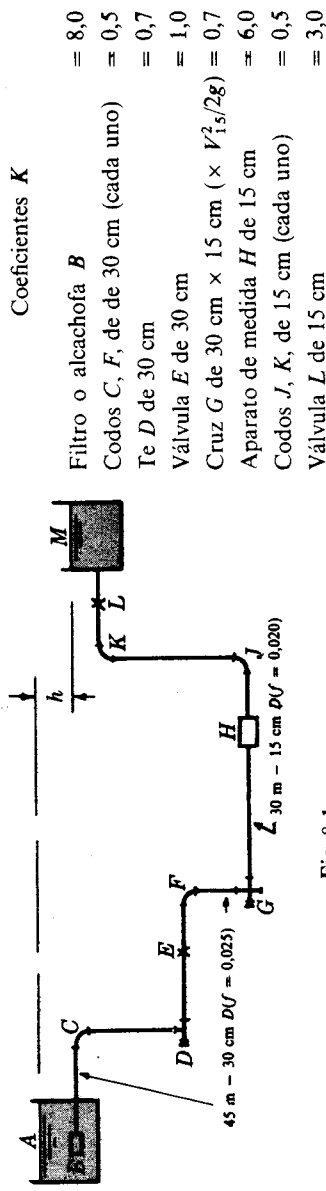


Fig. 8-1

### Solución:

Este problema se resolverá aplicando la ecuación de Bernoulli entre  $A$  y  $M$ , tomando como plano de referencia de cotas el horizontal que pasa por  $M$ , como sigue

$$(0 + 0 + h) - (8,0 + 2 \times 0,5 + 0,7 + 1,0 + 0,025 \times \frac{45}{0,30} \frac{V_{30}^2}{2g}) - (0,7 + 6,0 + 2 \times 0,5 + 3,0 + 1,0 + 0,020 \times \frac{30}{0,15} \frac{V_{15}^2}{2g}) = (0 + 0 + 0)$$

$$\text{De aquí, } h = 14,45 \frac{V_{30}^2}{2g} + 15,7 \frac{V_{15}^2}{2g} = (14,45 \times \frac{1}{16} + 15,7) \frac{V_{15}^2}{2g} = 16,6 \frac{V_{15}^2}{2g}.$$

Para cualquier valor de  $h$ , la pérdida de carga es  $16,6(V_{15}^2/2g)$ . La pérdida de carga en  $L_F$  m de tubería de 15 cm es  $f(L_F/d)(V_{15}^2/2g)$ . Igualando los dos valores,

$$16,6 \frac{V_{15}^2}{2g} = 0,020 \frac{L_F}{0,15} \frac{V_{15}^2}{2g} \quad \text{y} \quad L_F = 124,5 \text{ m}$$

La altura de velocidad puede suprimirse en esta igualdad. Debe recordarse que una equivalencia hidráulica exacta depende de  $f$ , que no se mantiene constante para grandes intervalos de velocidades.

7. Para el sistema de tuberías en serie del Problema 5, ¿cuál será el caudal que circula para una pérdida de carga total de 21,0 m, (a) utilizando el método de la tubería equivalente y (b) mediante el método del porcentaje?

### Solución:

- (a) Según el Problema 5, 4260 m de tubería de 40 cm son equivalentes al sistema de tuberías en serie. Para una pérdida de carga de 21,0 m

$$S_{40} = 21/4260 = 4,93 \text{ m/1000 m} \quad \text{y del Diagrama B, } Q_{100} = 140 \text{ l/seg}$$

De aquí,

$$Q_{130} = (130/100)140 = 182 \text{ l/seg}$$

- (b) El método del porcentaje requiere el cálculo de las pérdidas de carga para un caudal supuesto  $Q$ . Aunque se dispone de estos valores por el Problema 5, se van a calcular de nuevo, lo que servirá para comprobar la solución. Suponiendo  $Q_{130} = 65 \text{ l/seg}$ ,  $Q_{100} = (100/130)65 = 50 \text{ l/seg}$ , y a partir del Diagrama B,

$$S_{30} = 0,27 \text{ m}/1000 \text{ m} \text{ y pérdida de carga} = 0,27 \times 1,8 = 0,512 \text{ m} \quad (15,7 \%)$$

$$S_{40} = 0,77 \text{ m}/1000 \text{ m} \text{ y pérdida de carga} = 0,77 \times 1,2 = 0,922 \text{ m} \quad (28,5 \%)$$

$$S_{30} = 10,70 \text{ m}/1000 \text{ m} \text{ y pérdida de carga} = 10,70 \times 0,6 = 1,800 \text{ m} \quad (55,8 \%)$$

Para  $Q = 65 \text{ l/seg}$ : Pérdida de carga total = 3,234 m (100,0 %)

Los porcentajes son del mismo orden que los obtenidos en el Problema 5. Aplicando estos porcentajes a la pérdida total de carga dada de 21,0 m, se obtiene

$$H_{L50} = 21 \times 15,7 \% = 3,30 \text{ m}, \quad S = 3,30/1800 = 1,83 \text{ m}/1000 \text{ m}, \quad Q = 130/100 \times 142 = 185 \text{ l/seg}$$

$$H_{L40} = 21 \times 28,5 \% = 6,00 \text{ m}, \quad S = 6,00/1200 = 5,00 \text{ m}/1000 \text{ m}, \quad Q = 130/100 \times 140 = 182 \text{ l/seg}$$

$$H_{L30} = 21 \times 55,8 \% = 11,70 \text{ m}, \quad S = 11,70/600 = 19,50 \text{ m}/1000 \text{ m}, \quad Q = 130/100 \times 139 = 181 \text{ l/seg}$$

El cálculo con uno de los diámetros es suficiente para calcular el caudal  $Q$ , pero los demás sirven de comprobación y dan la seguridad de que no se han cometido equivocaciones.

8. En el sistema mostrado en la Fig. 8-2, cuando el caudal desde el depósito  $A$  al nudo principal  $D$  es de 140 l/seg, la presión en  $D$  es 1,40 kg/cm<sup>2</sup>. Se quiere aumentar el caudal hasta 184 l/seg, con una presión en  $D$  de 2,80 kg/cm<sup>2</sup>. ¿Qué diámetro debe de tener la tubería de 1500 m de longitud, que ha de ponerse entre  $B$  y  $C$  en paralelo (dibujada a trazos en la figura), con la existente de 30 cm de diámetro para satisfacer las condiciones exigidas?

#### Solución:

La elevación del depósito  $A$  puede determinarse a partir de las condiciones iniciales. Del Diagrama  $B$ ,

$$\text{para } Q = 140 \text{ l/seg}, \quad S_{40} = 4,8 \text{ m}/1000 \text{ m}, \quad \text{pérdida de carga} = 4,8 \times 2,4 = 11,5 \text{ m}$$

$$S_{30} = 20,0 \text{ m}/1000 \text{ m}, \quad \text{pérdida de carga} = 20,0 \times 1,5 = 30,0 \text{ m}$$

$$\text{Pérdida de carga total} = 41,5 \text{ m}$$

La línea de alturas piezométricas cae desde 41,5 m hasta una elevación de 14,0 m por encima de  $D$  (equivalentes a 1,40 kg/cm<sup>2</sup>). Por tanto, el depósito  $A$  está a  $(41,5 + 14,0) = 55,5 \text{ m}$  por encima de  $D$ .

Para una presión de 2,80 kg/cm<sup>2</sup>, la elevación de la línea de alturas piezométricas sobre  $D$  será de 28,0 m, de forma que la altura de carga disponible para el caudal de 184 l/seg es de  $(55,5 - 28,0) = 27,5 \text{ m}$ .

En la tubería de 40 cm,  $Q = 184 \text{ l/seg}$ ,  $S = 8,2 \text{ m}/1000 \text{ m}$ , pérdida de carga =  $8,2 \times 2,4 = 19,7 \text{ m}$ . De aquí,

$$\text{Pérdida de carga entre } B \text{ y } C = 27,5 - 19,7 = 7,8 \text{ m}$$

Para la tubería existente de 30 cm,  $S = 7,8/1500 = 5,2 \text{ m}/1000 \text{ m}$ ,  $Q = 68,0 \text{ l/seg}$  y el caudal en la tubería nueva, puesta en paralelo, será  $(184,0 - 68,0) = 116,0 \text{ l/seg}$  con una altura de carga disponible (caída de la línea de alturas piezométricas) de 7,8 m entre  $B$  y  $C$ .

$$S = 7,8/1500 = 5,2 \text{ m}/1000 \text{ m} \quad \text{y} \quad Q_{100} = (100/130)116 = 89,3 \text{ l/seg}$$

El Diagrama  $B$  da  $D = 34 \text{ cm}$  aproximadamente (se toma la tubería de diámetro normalizado inmediato superior).

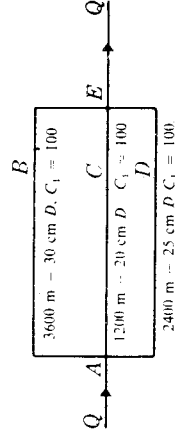


Fig. 8-3

En el sistema de tuberías en paralelo de la Figura 8-3 la altura de presión en  $A$  es de 36,0 m de agua y la altura de presión en  $E$  de 22,0 m de agua. Suponiendo que las tuberías están en un plano horizontal, ¿qué caudal circula por cada una de las ramas en paralelo?

**Solución:**

La caída de la línea de las alturas piezométricas entre  $A$  y  $E$  es  $(36 - 22) = 14$  m, despreciando los pequeños valores de las diferencias de las alturas de velocidad. Los caudales pueden conocerse, sin más, a partir de las pendientes de las líneas de las alturas piezométricas, que se determinan fácilmente. Así, mediante el Diagrama  $B$ ,

$$\begin{aligned} S_{30} &= 14/3600 = 3,90 \text{ m/1000 m}, & Q_{30} &= 58 \text{ l/seg}, & (42,0 \%) \\ S_{20} &= 14/1200 = 11,70 \text{ m/1000 m}, & Q_{20} &= 35 \text{ l/seg}, & (25,4 \%) \\ S_{25} &= 14/2400 = 5,85 \text{ m/1000 m}, & Q_{25} &= 45 \text{ l/seg}, & (32,6 \%) \\ & & Q_{\text{total}} &= 138 \text{ l/seg}, & (100,0 \%) \end{aligned}$$

10. Si en el Problema 9 el caudal total  $Q$  fuera de 280 l/seg, ¿qué pérdida de carga tiene lugar entre  $A$  y  $E$  y cómo se reparte el caudal en las ramas del circuito? Utilizar dos métodos, el del porcentaje y el de la tubería equivalente.

**Solución:**

En un sistema de tuberías en paralelo la magnitud hidráulica común es la pérdida de carga entre los nudos ( $AE$ ). La resolución se llevará a cabo como si no se hubiera resuelto el Problema 9.

Al suponer una pérdida de carga entre  $A$  y  $E$  de 8,0 m, los caudales para la pérdida de carga supuesta pueden obtenerse a partir del Diagrama  $B$ .

$$\begin{aligned} S_{30} &= 8/3600 = 2,22 \text{ m/1000 m}, & Q_{30} &= 45 \text{ l/seg}, & (42,8 \%) \\ S_{20} &= 8/1200 = 6,67 \text{ m/1000 m}, & Q_{20} &= 27 \text{ l/seg}, & (25,7 \%) \\ S_{25} &= 8/2400 = 3,33 \text{ m/1000 m}, & Q_{25} &= 33 \text{ l/seg}, & (31,5 \%) \\ & & Q_{\text{total}} &= 105 \text{ l/seg}, & (100,0 \%) \end{aligned}$$

**(a) Método del porcentaje.**

El caudal en cada rama del circuito será un porcentaje constante del caudal total a través del circuito para un intervalo razonable de las pérdidas de carga entre los nudos. Los porcentajes encontrados coinciden razonablemente con los tabulados en el Problema 9 (dentro de la precisión obtenida en el Diagrama  $B$  y con la regla de cálculo). Aplicando los porcentajes al caudal dado de 280 l/seg,

$$\begin{aligned} Q_{30} &= 42,8 \% \times 280 = 120,0 \text{ l/seg}, & S_{30} &= 15,0 \text{ m/1000 m}, & (H_L)_{A-E} &= 54 \text{ m} \\ Q_{20} &= 25,7 \% \times 280 = 72,0 \text{ l/seg}, & S_{20} &= 43,0 \text{ m/1000 m}, & (H_L)_{A-E} &= 52 \text{ m} \\ Q_{25} &= 31,5 \% \times 280 = 88,0 \text{ l/seg}, & S_{25} &= 22,0 \text{ m/1000 m}, & (H_L)_{A-E} &= 53 \text{ m} \\ & & Q &= 280,0 \text{ l/seg} \end{aligned}$$

Este método da una comprobación de los cálculos, como se deduce de los tres valores de la pérdida de carga obtenidos. Es el método de cálculo recomendado.

**(b) Método de la tubería equivalente** (utilizar el diámetro de 30 cm).

Deben calcularse los caudales para una pérdida de carga supuesta, como en el método anterior. Empleando los mismos valores, para una pérdida de carga de 8,0 m, el caudal total a través del sistema de tuberías en paralelo es de 105 l/seg. Una tubería equivalente daría el mismo caudal para una pérdida de carga de 8,0 m, es decir,

$$Q = 105 \text{ l/seg}, \quad H_L = 8,0 \text{ m} \quad \text{y} \quad S_{30} = 11,8 \text{ m/1000 m, obtenida del Diagrama } B.$$

De  $S = h/L$ ,  $11,8 = 8,0 \text{ m}/L_E \text{ m}$ , y  $L_E = 678 \text{ m}$  (de tubería de 30 cm,  $C_1 = 100$ ).

Para el caudal dado de 280 l/seg,  $S_{30} = 80 \text{ m/1000 m}$  y la pérdida de carga entre  $A-E = 80 \times 678/1000 = 54 \text{ m}$ . Con esta pérdida de carga pueden obtenerse los valores de los tres caudales.

11. Para el sistema mostrado en la Fig. 8-4, (a) ¿cuál es el caudal si la caída de la línea de alturas piezométricas entre  $A$  y  $B$  es de 60 cm? (b) ¿Qué longitud de una tubería de 50 cm ( $C_1 = 120$ ) es equivalente al sistema  $AB$ ?

**Solución:**

(a) La solución más directa puede obtenerse suponiendo una caída de la línea de alturas piezométricas (pérdida de carga) entre  $W$  y  $Z$  y sacar de esta hipótesis una conclusión lógica.

Por ejemplo, suponiendo una pérdida de carga entre  $W$  y  $Z$  de 9 m, a partir del Diagrama  $B$ ,

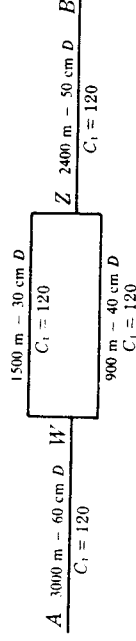


Fig. 8-4

$$\begin{aligned} S_{30} &= 9/1500 = 6,0 \text{ m/1000 m} & \text{y} & \quad Q_{30} = (120/100)72 = 86,4 \text{ l/seg, (26,4 \%)} \\ S_{40} &= 9/900 = 10,0 \text{ m/1000 m} & \text{y} & \quad Q_{40} = (120/100)200 = 240,0 \text{ l/seg, (73,6 \%)} \\ & & & \quad Q \text{ total} = 326,4 \text{ l/seg, (100,0 \%)} \end{aligned}$$

Ahora puede calcularse la pérdida de carga entre  $A$  y  $B$  para el caudal total de 326,4 l/seg. Al emplear el Diagrama  $B$ , se utiliza  $Q_{100} = (100/120)326,4 = 272,0 \text{ l/seg}$ .

$$\text{De } A \text{ a } W, \quad S_{60} = 2,6 \text{ m/1000 m}, \quad H_L = 2,6 \frac{3000}{1000} = 7,8 \text{ m, (24,0 \%)}$$

$$\text{De } W \text{ a } Z, \quad (\text{el supuesto}) = 9,0 \text{ m, (28,0 \%)}$$

$$\text{De } Z \text{ a } B, \quad S_{50} = 6,5 \text{ m/1000 m}, \quad H_L = 6,5 \frac{2400}{1000} = 15,6 \text{ m, (48,0 \%)}$$

$$\text{Pérdida de carga total (para } Q = 326,4 \text{ l/seg)} = 32,4 \text{ m, (100,0 \%)}$$

Aplicando estos porcentajes a la pérdida de carga dada de 60 m, se obtiene:

$$(H_L)_{A-W} \text{ (real)} = 60 \times 24 \% = 14,4 \text{ m}, \quad S_{60} = \frac{14,4}{3000} = 4,8 \text{ m/1000 m;}$$

$$(H_L)_{W-Z} \text{ (real)} = 60 \times 28 \% = 16,8 \text{ m;}$$

$$(H_L)_{Z-B} \text{ (real)} = 60 \times 48 \% = 28,8 \text{ m}, \quad S_{50} = \frac{28,8}{2400} = 12 \text{ m/1000 m.}$$

Del Diagrama  $B$ , el caudal en la tubería de 60 cm será  $(120/100)(380) = 456 \text{ l/seg}$ .

Como comprobación, en la tubería de 50 cm el caudal será  $Q = (120/100)(380) = 456 \text{ l/seg}$ .

Este caudal se divide en el circuito  $WZ$  en los porcentajes calculados antes, es decir, 26,4 % y 73,6 %.

- (b) Utilizando la información anterior para el sistema entre  $A$  y  $B$ , un caudal de 326,4 l/seg produce una caída en la línea de alturas piezométricas de 32,4 m. Para este caudal de 326,4 l/seg y en una tubería de 50 cm,  $C_1 = 120$

$$S_{50} = 6,0 \text{ m/1000 m} = 32,4/L_E \quad \text{o bien} \quad L_E = 5400 \text{ m}$$

12. En el sistema de la Fig. 8-5, determinar las alturas de presión en  $A$  y  $B$  cuando la bomba manda un caudal de 140 l/seg. Dibujar la línea de alturas piezométricas.

**Solución:**

Se determina la tubería equivalente al sistema en paralelo entre  $BC$ : en tubería de 40 cm de diámetro,  $C_1 = 100$ . Una vez determinada, se tiene únicamente una tubería de la misma rugosidad relativa, con la que los cálculos son sencillos para cualquier condición de flujo. Suponiendo una caída en la línea de alturas piezométricas de 7 m entre  $B$  y  $C$ , se obtienen los siguientes valores, mediante el Diagrama  $B$ ,

$$\begin{aligned} S_{2,5} &= 7/3000 = 2,33 \text{ m/1000 m}, & Q_{2,5} &= 27,0 \text{ l/seg} \\ S_{2,0} &= 7/3300 = 2,12 \text{ m/1000 m}, & Q_{2,0} &= 14,0 \text{ l/seg} \\ & & Q \text{ total} &= 41,0 \text{ l/seg} \end{aligned}$$

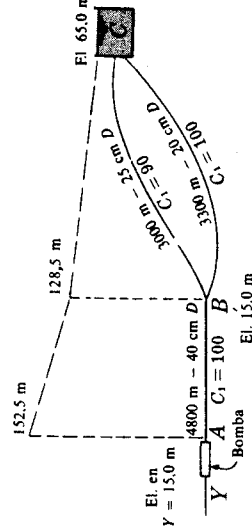


Fig. 8-5

Para  $Q = 41.0$  l/seg y  $D = 40$  cm ( $C_1 = 100$ ),  $S_{4,0} = 0,55$  m/1000 m =  $7,0/L_E$  y  $L_E = 12.700$  m.  
 El caudal enviado por la bomba al depósito es de 140 l/seg. Para una longitud de  $(12.700 + 4800) = 17.500$  m de tubería equivalente de 40 cm, la pérdida de carga entre  $A$  y  $C$  será

$$S_{4,0} = 5,00 \text{ m/1000 m}, H_L = 5,00(17.500/1000) = 87,5 \text{ m}$$

Por tanto, la altura piezométrica en  $A$  será  $(65,0 + 87,5) = 152,5$  m, según se muestra en la figura. La caída de  $A$  a  $B = 5,00(4800/1000) = 24,0$  m y la elevación en  $B$  será  $(152,5 - 24,0) = 128,5$  m.

$$\text{Altura de presión en } A = 152,5 - 15,0 = 137,5 \text{ m}$$

$$\text{Altura de presión en } B = 128,5 - 15,0 = 113,5 \text{ m}$$

13. En la Fig. 8-6, ¿qué sistema tiene más capacidad, el  $ABCD$  o el  $EFGH$ ? ( $C_1 = 120$  para todas las tuberías.)

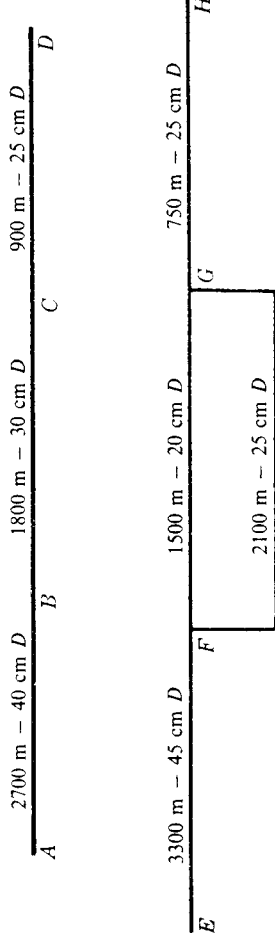


Fig. 8-6

#### Solución:

Suponiendo  $Q = 90$  l/seg en  $ABCD$ , mediante el Diagrama  $B$ , con  $Q_{100} = (100/120)90 = 75$  l/seg,

$$S_{4,0} = 1,6 \text{ m/1000 m}, H_L = 1,6(2700/1000) = 4,3 \text{ m}$$

$$S_{3,0} = 6,5 \text{ m/1000 m}, H_L = 6,5(1800/1000) = 11,7 \text{ m}$$

$$S_{2,5} = 15,0 \text{ m/1000 m}, H_L = 15,0(900/1000) = 13,5 \text{ m}$$

$$\text{Para } Q = 90 \text{ l/seg, Pérd. Carga total} = 29,5 \text{ m}$$

Para hallar el porcentaje de un caudal cualquiera  $Q$ , que circula por cada una de las ramas del circuito  $FG$ , en el sistema  $EFGH$ , se supone una pérdida de carga entre  $F$  y  $G$  de 8,0 m. Entonces,

$$S_{2,0} = 8/1500 = 5,33 \text{ m/1000 m y } Q_{2,0} = 24,0 \text{ l/seg, } (40,7 \%)$$

$$S_{2,5} = 8/2100 = 3,81 \text{ m/1000 m y } Q_{2,5} = 35,0 \text{ l/seg, } (59,3 \%)$$

$$Q_{100} \text{ total} = 59,0 \text{ l/seg, } (100,0 \%)$$

Para dictaminar sobre la capacidad de cada uno de los sistemas pueden seguirse varios caminos. Mejor que utilizar tuberías equivalentes se podrían calcular las pérdidas de carga producidas por un caudal de 90 l/seg, por ejemplo, a través de cada uno de los sistemas. El sistema que dé lugar a una pérdida de carga menor sería el de mayor capacidad. O bien podría determinarse el caudal  $Q$  que circula por cada uno de los sistemas para la misma pérdida de carga. El sistema por el que circule un caudal mayor sería el de mayor capacidad. En el caso presente, se va a comparar la pérdida de carga de 29,5 m, que tiene lugar en  $ABCD$ , para  $Q = 90$  l/seg ( $Q_{100} = 75$  l/seg), con el valor de la pérdida de carga obtenido en el sistema  $EFGH$ , para el mismo caudal.

$$(a) \text{ Para } Q_{4,5} = 75 \text{ l/seg, } S_{4,5} = 0,90 \text{ m/1000 m, } (H_L)_{EF} = 3,0 \text{ m.}$$

$$(b) \text{ Para } Q_{2,0} = 40,7 \% \times 75 = 30,5 \text{ l/seg, } S_{2,0} = 8,7 \text{ m/1000 m, } (H_L)_{FG} = 13,1 \text{ m,}$$

$$\text{o para } Q_{2,5} = 59,3 \% \times 75 = 44,5 \text{ l/seg, } S_{2,5} = 6,2 \text{ m/1000 m, } (H_L)_{FG} = 13,0 \text{ m.}$$

$$(c) \text{ Para } Q_{2,5} = 75 \text{ l/seg, } S_{2,5} = 15,5 \text{ m/1000 m, } (H_L)_{GH} = 11,6 \text{ m.}$$

Luego la pérdida de carga total de  $E$  a  $H = 27,7$  m.

Por tanto, el sistema  $EFGH$  tiene mayor capacidad.

14. En la Fig. 8-7 el caudal que sale del depósito *A* es de 430 l/seg. Determinar la potencia extraída por la turbina *DE* si la altura de presión en *E* es de  $-3,0$  m. Dibujar las líneas de alturas piezométricas.

**Solución:**

El análisis del sistema ramificado debe concentrarse sobre el punto *C*. En primer lugar la suma de caudales que llegan a *C* ha de ser igual a la suma de caudales que salen de *C*. En segundo lugar, la elevación de la línea de alturas piezométricas en *C* es, por lo general, la clave de la solución.

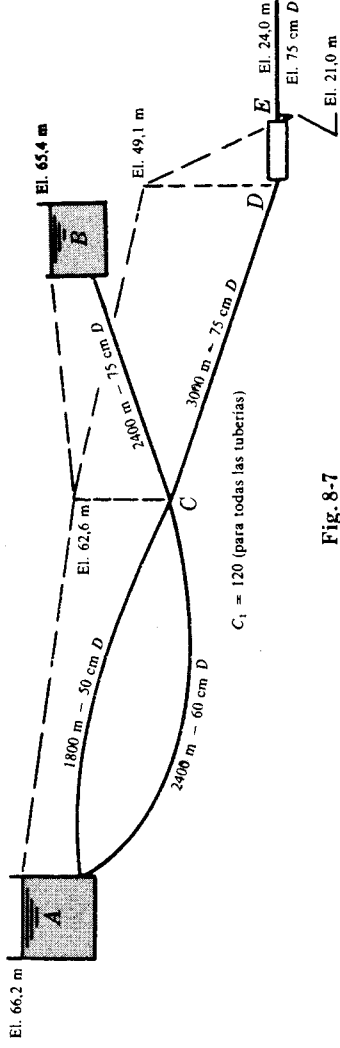


Fig. 8-7

Para calcular la altura de la línea de alturas piezométricas en *C* se supone que la pérdida de carga de *A* a *C* es de 7,0 m. Entonces,

$$\begin{aligned} S_{50} &= 7/1800 = 3,90 \text{ m/1000 m}, & Q_{50} &= 216 \text{ l/seg.} & (42,6 \%) \\ S_{60} &= 7/2400 = 2,92 \text{ m/1000 m}, & Q_{60} &= 290 \text{ l/seg.} & (57,4 \%) \\ Q_{\text{total}} &= 506 \text{ l/seg.} & & & (100,0 \%) \end{aligned}$$

Aplicando estos porcentajes al caudal dado de 430 l/seg de *A* a *C*, teniendo en cuenta que para  $C_1 = 100$ ,  $Q = (100/120)430 = 358 \text{ l/seg.}$

$$Q_{50} = 151 \text{ l/seg.}, \quad S_{50} = 2,00 \text{ m/1000 m}, \quad H_L = 3,6 \text{ m}$$

$$Q_{60} = 207 \text{ l/seg.}, \quad S_{60} = 1,50 \text{ m/1000 m}, \quad H_L = 3,6 \text{ m (comprobación)}$$

Así, la elevación de la línea de alturas piezométricas en *C* es  $66,2 - 3,6 = 62,6$  m. Con esta información, la línea de alturas piezométricas cae 2,8 m de *B* a *C* y el flujo circulará desde *B* hacia *C*. De aquí,

$$S_{75} = 2,8/2400 = 1,17 \text{ m/1000 m}, \quad Q_{(100)} = 340 \text{ l/seg.}, \quad Q_{(120)} = (120/100)340 = 408 \text{ l/seg}$$

Además,

$$\begin{aligned} \text{caudal que sale de } C &= \text{caudal que entra en } C \\ Q_{C-D} &= 430 + 408 = 838 \text{ l/seg} \end{aligned}$$

para  $C_1 = 120$ , y para  $C_1 = 100$ ,  $Q = 698 \text{ l/seg.}$

Por tanto,  $S_{75} = 4,5 \text{ m/1000 m}$ ,  $(H_L)_{C-D} = 13,5 \text{ m}$ , y la elevación de la línea de alturas piezométricas en *D* es  $62,6 - 13,5 = 49,1 \text{ m}$ .

$$\text{Potencia extraída (CV)} = \frac{1000(0,838)(49,1 - 21,0)}{75} = 314 \text{ CV.}$$

15. En la Fig. 8-8 la válvula *F* está parcialmente cerrada, lo que produce una pérdida de carga de 1,00 m cuando el caudal que circula a través de ella es de 28 l/seg. ¿Cuál es la longitud de la tubería de 25 cm que parte del depósito *A*?

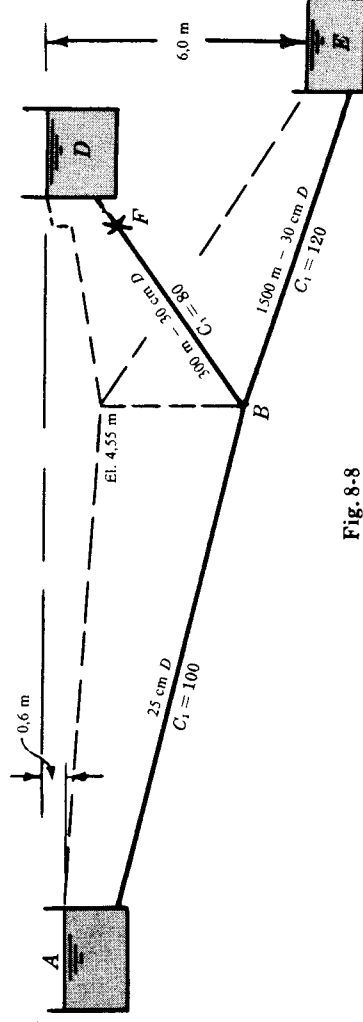


Fig. 8-8

Solución:

Para *DB* el caudal  $Q = 28 \text{ l/seg}$  ( $C_1 = 80$ ) y para  $C_1 = 100$ ,  $Q = (100/80)28 = 35,0 \text{ l/seg}$ , y  $S_{30} = 1,5 \text{ m/1000 m}$ .

Pérdida total de carga de *D* a *B* =  $1,50(300/1000) + 1,00 = 1,45 \text{ m}$ , lo que da una elevación de la línea de alturas piezométricas en *B* de  $4,55 \text{ m}$  (tomando elevación en  $E = 0$ ).

Para *BE*,  $S_{30} = (4,55 - 0,0)/1500 = 3,03 \text{ m/1000 m}$  y  $Q = 52 \text{ l/seg}$  ( $C_1 = 100$ ), para  $C_1 = 120$ ,  $Q = 62,4 \text{ l/seg}$ .

Para *AB*, el caudal  $Q = 62,4 - 28,0 = 34,4 \text{ l/seg}$  y  $S_{2,5} = 3,50 \text{ m/1000 m}$  (por el Diagrama *B*). Por tanto, de  $S = h/L$ ,  $L = h/S = (0,85/3,50)1000 = 243 \text{ m}$ .

16. Se han de bombear  $55 \text{ l/seg}$  de agua a través de  $1200 \text{ m}$  de una tubería nueva de fundición hasta un recipiente, cuya superficie libre está  $36 \text{ m}$  sobre el nivel del agua que se bombea. El coste anual del bombeo de  $55 \text{ l/seg}$  es de  $16,40\$$  por  $\text{m}$  de carga contra la que se bombea, y el coste anual de la tubería es el  $10 \%$  de su precio inicial. Suponiendo que el precio de la tubería de fundición es el lugar de emplazamiento es de  $140,00\$$  por tonelada, para el tipo *B* ( $50 \text{ m}$  de carga) de tubería que tiene los siguientes pesos por metro de longitud: de  $15 \text{ cm}$ ,  $49,5 \text{ kg}$ ; de  $20 \text{ cm}$ ,  $71,0 \text{ kg}$ ; de  $25 \text{ cm}$ ,  $95,0 \text{ kg}$ ; de  $30 \text{ cm}$ ,  $122,0 \text{ kg}$  y de  $40 \text{ cm}$ ,  $186,0 \text{ kg}$ . Determinar el diámetro de tubería más económico para esta instalación.

Solución:

Se hacen con detalle los cálculos para la tubería de  $30 \text{ cm}$  y los resultados para todas las tuberías se resumen en la tabla que se da más abajo. La pérdida de carga en la tubería de  $30 \text{ cm}$ , por el Diagrama *B*, teniendo en cuenta que para  $C_1 = 100$ ,  $Q = (100/130)55 = 42,3 \text{ l/seg}$ , será  $2,10 \text{ m/1000 m}$ .

De aquí, altura total contra la que se bombea =  $36 + 1200(2,10/10000) = 38,5 \text{ m}$ .

Coste de bombeo =  $38,5 \times 16,40\$ = 631\$$  por año  
Coste de la tubería a pie de obra =  $140\$ \times 1200 \times 122/1000 = 20.500\$$   
Coste anual de la tubería =  $10 \% \times 20.500\$ = 2050\$$

Tabulando estos resultados para su comparación con los costes de las tuberías de los otros diámetros considerados, se obtiene la siguiente tabla:

| <i>D</i><br>cm | <i>S</i><br>m/1000 m | Pérd. Carga<br>en m | Altura total de<br>bombeo = $36 + H_L$ | Coste anual para $55 \text{ l/seg}$<br>Bombeo + Coste tubería = Total |         |
|----------------|----------------------|---------------------|--|---|---------|
| 15             | 65,0                 | 78,0                | 114,0 m                                | 1870 \$   | 830 \$  |
| 20             | 16,2                 | 19,5                | 55,5 m                                 | 910   | 1190    |
| 25             | 5,3                  | 6,4                 | 42,4 m                                 | 694   | 1600    |
| 30             | 2,1                  | 2,5                 | 38,5 m                                 | 631   | 2050    |
| 40             | 0,6                  | 0,7                 | 36,7 m                                 | 602   | 3130    |
|                |                      |                     |  |   | 2700 \$ |
|                |                      |                     |  |   | 2100    |
|                |                      |                     |  |   | 2294    |
|                |                      |                     |  |   | 2681    |
|                |                      |                     |  |   | 3732    |

El diámetro más económico es el de  $20 \text{ cm}$ .

17. Cuando las superficies libres de los depósitos que se muestran en la Fig. 8-9(a) se mantienen a una elevación constante, ¿qué caudales tienen lugar?

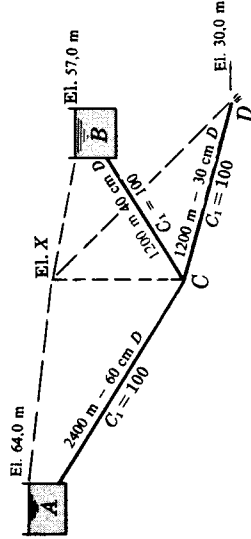


Fig. 8-9(a)

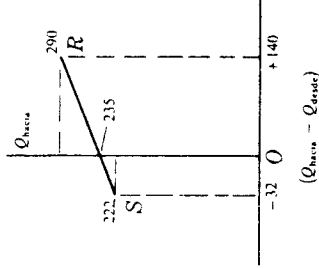


Fig. 8-9(b)

**Solución:**

Como la elevación de la línea de alturas piezométricas en  $C$  no puede determinarse, por ser desconocidos todos los caudales, el problema se resolverá por tanteos. En el primero es conveniente elegir como altura piezométrica en  $C$ , 57 m. Con esto, el caudal que sale o entra en el recipiente  $B$  será nulo, lo que reduce el número de cálculos.

Para una altura piezométrica en  $C = 57,0$  m,

$$S_{60} = (64 - 57)/2400 = 2,91 \text{ m}/1000 \text{ m} \quad \text{y} \quad Q = 290 \text{ l/seg hacia } C$$

$$S_{30} = (57 - 30)/1200 = 22,5 \text{ m}/1000 \text{ m} \quad \text{y} \quad Q = 150 \text{ l/seg desde } C$$

De los valores de estos caudales se infiere que la altura piezométrica en  $C$  debe ser mayor, de forma que se reduzca el caudal desde  $A$ , aumente el que va a  $D$  y circule cierto caudal hacia  $B$ . Con el fin de «horquillar» la verdadera altura piezométrica de  $C$ , se supone ahora igual a 60 m. Así, para una elevación en  $C = 60,0$  m,

$$S_{60} = (64 - 60)/2400 = 1,67 \text{ m}/1000 \text{ m} \quad \text{y} \quad Q = 222 \text{ l/seg hacia } C$$

$$S_{40} = (60 - 57)/1200 = 2,50 \text{ m}/1000 \text{ m} \quad \text{y} \quad Q = 98 \text{ l/seg desde } C$$

$$S_{30} = (60 - 30)/1200 = 25,0 \text{ m}/1000 \text{ m} \quad \text{y} \quad Q = 156 \text{ l/seg desde } C$$

El caudal que sale de  $C$  es de 254 l/seg, mientras que el caudal que llega a  $C$  es de 222 l/seg. Mediante la Fig. 8-9(b) puede obtenerse una tercera aproximación mucho más cercana a la verdadera, uniendo mediante una recta los puntos  $R$  y  $S$ . La recta así dibujada corta al eje vertical, trazado por  $(Q_{\text{hacia}} - Q_{\text{desde}}) = 0$ , en  $Q_{\text{hacia}} = 235$  l/seg (apreciado por el dibujo a escala). Como, además, los valores representados no varían en realidad linealmente, puede utilizarse para el caudal que va hacia  $C$  un valor ligeramente mayor, por ejemplo, 245 l/seg.

Para  $Q = 245$  l/seg (hacia  $C$ ),  $S_{60} = 2,00 \text{ m}/1000 \text{ m}$  y  $(H_L)_{A-C} = 2,00 \times 2400/1000 = 4,8$  m y la altura piezométrica en  $C = (64,0 - 4,8) = 59,2$  m. De aquí,

$$S_{40} = 2,20/1200 = 1,83 \text{ m}/1000 \text{ m}, \quad Q = 80 \text{ l/seg desde } C$$

$$S_{30} = 29,2/1200 = 24,30 \text{ m}/1000 \text{ m}, \quad Q = 155 \text{ l/seg desde } C$$

$$Q \text{ total desde } C = 235 \text{ l/seg}$$

Estos dos caudales son lo suficiente parecidos para no requerir cálculos posteriores. (Para una altura piezométrica en  $C$  de 59,5 m, da para los caudales que entran y salen de  $C$  valores iguales aproximadamente a 238 l/seg.)

Desarrollar la expresión empleada en el estudio de los caudales en redes de tuberías.

**Solución:**

El método de cálculo, desarrollado por el profesor Hardy Cross, consiste en suponer unos caudales en todas las ramas de la red y a continuación hacer un balance de las pérdidas de carga calculadas. En el lazo o circuito único, mostrado en la Fig. 8-10, para que los caudales en cada rama del lazo sean los correctos se habrá de verificar

$$(H_L)_{ABC} = (H_L)_{ADC} \quad \text{o} \quad (H_L)_{ABC} - (H_L)_{ADC} = 0 \quad (1)$$

Fig. 8-10

Para aplicar esta expresión, la pérdida de carga en función del caudal ha de ponerse en la forma  $H_L = kQ^n$ . En el caso de utilizar la fórmula de Hazen-Williams, la expresión anterior toma la forma  $H_L = kQ^{1,85}$ .

Como se suponen unos caudales  $Q_o$ , el caudal verdadero  $Q$  en una tubería cualquiera de la red puede expresarse  $Q = Q_o + \Delta$ , donde  $\Delta$  es la corrección que ha de aplicarse a  $Q_o$ . Entonces, mediante el desarrollo del binomio,

$$kQ^{1,85} = k(Q_o + \Delta)^{1,85} = k(Q_o^{1,85} + 1,85 Q_o^{1,85-1} \Delta + \dots)$$

Se desprecian los términos a partir del segundo por ser pequeño  $\Delta$  comparado con  $Q_o$ .

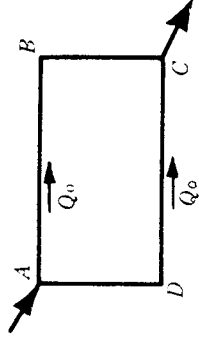
Para el lazo o circuito mostrado en la figura, al sustituir en la ecuación (1) se obtiene

$$k(Q_o^{1,85} + 1,85 Q_o^{0,85} \Delta) - k(Q_o^{1,85} + 1,85 Q_o^{0,85} \Delta) = 0$$

$$k(Q_o^{1,85} - Q_o^{1,85}) + 1,85k(Q_o^{0,85} - Q_o^{0,85})\Delta = 0$$

$$\Delta = - \frac{k(Q_o^{1,85} - Q_o^{1,85})}{1,85k(Q_o^{0,85} - Q_o^{0,85})}$$

Despejando  $\Delta$ ,





En general, para un circuito más complicado, se tiene

$$\Delta = -\frac{\Sigma kQ_0^{1,85}}{1,85 \Sigma kQ_0^{0,85}} \quad (3)$$

Pero  $kQ_0^{1,85} = H_L$  y  $kQ_0^{0,85} = H_L/Q_0$ . Por tanto,

$$\Delta = -\frac{\Sigma (H_L)}{1,85 \Sigma (H_L/Q_0)} \quad \text{para cada lazo de la red} \quad (4)$$

Al utilizar la fórmula (4) debe ponerse cuidado en el signo del numerador. La expresión (1) pone de manifiesto que los caudales que coinciden con el giro de las agujas de un reloj producen pérdidas de carga en el mismo sentido, y que los caudales no coincidentes con el giro de las agujas de un reloj producen caídas de carga también en sentido contrario. Es decir, el signo menos se asigna a todas las magnitudes hidráulicas cuyo sentido sea contrario al de las agujas de un reloj, o, lo que es lo mismo, al caudal  $Q$  y a las pérdidas de carga  $H_L$ . Para evitar errores en los cálculos debe observarse siempre este convenio de signos. Por otra parte, el denominador de (4) tiene siempre signo positivo.

En los dos problemas siguientes se ilustra el procedimiento de aplicación de la ecuación (4)

19. El sistema de tuberías en paralelo, mostrado en la Fig. 8-11, es el mismo que aparece como parte del sistema del Problema 11. Determinar, para  $Q = 456$  l/seg (caudal total), los caudales en las dos ramas del circuito utilizando el método de Hardy Cross.

**Solución:**

Se supone que los caudales  $Q_{30}$  y  $Q_{40}$  son iguales, respectivamente, a 150 l/seg y 306 l/seg. Los cálculos se realizan en la tabla que sigue (obsérvese que se ha puesto  $-306$  l/seg), procediendo así: se calculan los valores de  $S$  mediante el Diagrama B, o por cualquier otro procedimiento, luego  $H_L = S \times L$  y a continuación se determinan  $H_L/Q_0$ . Se notará que cuanto mayor sea  $\Sigma H_L$  más alejados de los correctos estarán los caudales  $Q$ . (Los valores de  $Q$  se han elegido deliberadamente distintos de los correctos para que den lugar a valores grandes de  $\Sigma H_L$  y así ilustrar el procedimiento.)

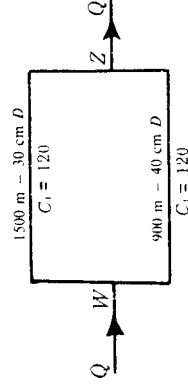


Fig. 8-11

| D<br>cm | L<br>m | Q <sub>0</sub> supuesto<br>l/seg | S<br>m/1000 m | H <sub>L</sub> , m | H <sub>L</sub> /Q <sub>0</sub> | Δ     | Q <sub>1</sub> |
|---------|--------|----------------------------------|---------------|--------------------|--------------------------------|-------|----------------|
| 30      | 1500   | 150                              | 17,0          | 25,5               | 0,170                          | -27,8 | 122,2          |
| 40      | 900    | -306                             | -16,0         | -14,4              | 0,046                          | -27,8 | -333,8         |
|         |        | Σ = 456                          | Σ = +11,1     |                    | 0,216                          |       | 456,0          |

$$\Delta = -\frac{\Sigma H_L}{1,85 \Sigma (H_L/Q)} = -\frac{+11,1}{1,85(0,216)} = -27,8 \text{ l/seg}$$

Entonces, los valores de  $Q_1$  serán  $(150,0 - 27,8) = 122,2$  l/seg y  $(-306,0 - 27,8) = -333,8$  l/seg. Repitiendo, de nuevo el proceso de cálculo

| S        | H <sub>L</sub> | H <sub>L</sub> /Q <sub>1</sub> | Δ    | Q <sub>2</sub> |
|----------|----------------|--------------------------------|------|----------------|
| 11,0     | 16,5           | 0,135                          | +3,2 | 125,4          |
| -19,0    | -17,1          | 0,051                          | +3,2 | 330,6          |
| Σ = -0,6 |                | 0,186                          |      | 456,0          |

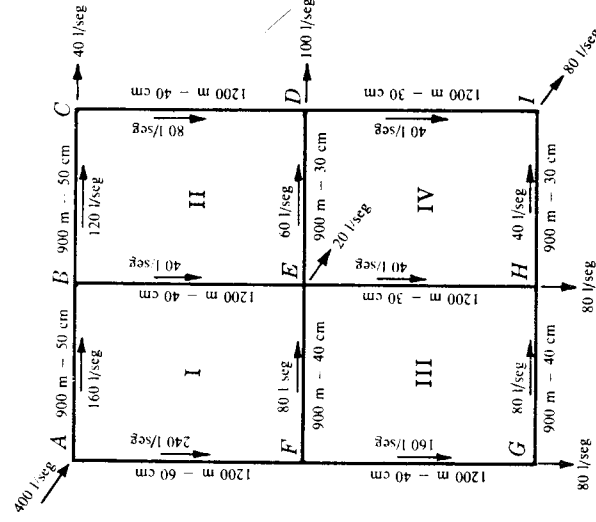
No es necesario hacer una nueva aproximación ya que en el Diagrama B no puede conseguirse una mayor precisión de 3,0 l/seg aproximadamente. Teóricamente,  $\Sigma H_L$  debería ser igual a cero, pero esta condición se obtiene muy raramente.

Se observará que en el Problema 11 el caudal que fluye por la tubería de 30 cm era el 26,4 % de 456 l/seg, es decir, 120,4 l/seg, lo que constituye una comprobación satisfactoria.

**20.** El agua fluye a través del sistema de tuberías mostrado en la Fig. 8-12, en el que se conocen ciertos caudales, como se indica en la figura. En el punto *A*, la elevación es de 60,0 m y la altura de presión de 45,0 m. La elevación en *I* es de 30,0 m. Determinar (*a*) los caudales a través de la red de tuberías y (*b*) la altura de presión en *I*. (Utilizar  $C_f = 100$ ).

**Solución:**

- (a) El método de cálculo puede resumirse como sigue:
  - (1) Se suponen una serie de caudales iniciales, precediendo circuito por circuito —en este caso los lazos o circuitos son el I, II, III y IV—. Hay que poner cuidado en que los caudales *que llegan* a cada nudo sean igual en valor a la suma de los caudales *salientes* del mismo (principio de continuidad).
  - (2) Para cada lazo se calcula la pérdida de carga en cada una de las tuberías del circuito (analíticamente, por el Diagrama *B* o bien mediante una regla de cálculo hidráulica).
  - (3) Se suman las pérdidas de carga en cada circuito en el sentido de las agujas de un reloj, teniendo en cuenta la colocación correcta de los signos (si la suma de las pérdidas de carga fuera nula, los caudales  $Q_1$  supuestos serían los correctos).
  - (4) Se suman los valores de  $H_L/Q_1$ , calculando a continuación el término  $\Delta$  de corrección de los caudales en cada lazo.
  - (5) Se corrige el caudal en cada una de las tuberías en  $\Delta$ , con lo que se aumenta o disminuye en esa cantidad cada caudal  $Q$  supuesto. Para los casos en que una tubería pertenece a dos circuitos, debe aplicarse como corrección al caudal supuesto en esta tubería la diferencia entre los dos  $\Delta$  (véase la aplicación siguiente).
  - (6) Se continúa de forma análoga hasta que los valores de los  $\Delta$  sean despreciables.



**Fig. 8-12**

| Tramo | D, cm | L, m | $Q_1, \text{l/seg}$<br>(supuesto) | S<br>m/1000 m | $H_L, \text{m}$   | $\frac{H_L}{Q_1}$ | $\Delta$               | $Q_2$  |
|-------|-------|------|-----------------------------------|---------------|-------------------|-------------------|------------------------|--------|
| AB    | 50    | 900  | 160                               | 2,20          | 1,980             | 0,0124            | +13,3                  | 173,3  |
| BE    | 40    | 1200 | 40                                | 0,50          | 0,600             | 0,0150            | +13,3 - (5,3) = +8,0   | 48,0   |
| EF    | 40    | 900  | -80                               | -1,90         | -1,710            | 0,0214            | +13,3 - (24,2) = -10,9 | -90,9  |
| FA    | 60    | 1200 | -240                              | -1,92         | -2,304            | 0,0096            | +13,3                  | -226,7 |
|       |       |      |                                   |               | $\Sigma = -1,434$ | 0,0584            |                        |        |
| BC    | 50    | 900  | 120                               | 1,30          | 1,170             | 0,0098            | +5,3                   | 125,3  |
| CD    | 40    | 1200 | 80                                | 1,90          | 2,160             | 0,0270            | +5,3                   | 85,3   |
| DE    | 30    | 900  | -60                               | -4,30         | -3,870            | 0,0645            | +5,3 - (-4,9) = +10,2  | -49,8  |
| EB    | 40    | 1200 | -40                               | -0,50         | -0,600            | 0,0150            | +5,3 - (13,3) = -8,0   | -48,0  |
|       |       |      |                                   |               | $\Sigma = -1,140$ | 0,1163            |                        |        |
| FE    | 40    | 900  | 80                                | 1,90          | 1,710             | 0,0214            | +24,2 - (13,3) = +10,9 | 90,9   |
| EH    | 30    | 1200 | 40                                | 2,00          | 2,400             | 0,0600            | +24,2 - (-4,9) = +29,1 | 69,1   |
| HG    | 40    | 900  | -80                               | -1,80         | -1,620            | 0,0203            | +24,2                  | -55,8  |
| GF    | 40    | 1200 | -160                              | -6,50         | -9,800            | 0,0613            | +24,2                  | -135,8 |
|       |       |      |                                   |               | $\Sigma = -7,310$ | 0,1630            |                        |        |
| ED    | 30    | 900  | 60                                | 4,30          | 3,870             | 0,0645            | -4,9 - (5,3) = -10,2   | 49,8   |
| DI    | 30    | 1200 | 40                                | 2,00          | 2,400             | 0,0600            | -4,9                   | 35,1   |
| IH    | 30    | 900  | -40                               | -2,00         | -1,800            | 0,0450            | -4,9                   | -44,9  |
| HE    | 30    | 1200 | -40                               | -2,00         | -2,400            | 0,0600            | -4,9 - (24,2) = -29,1  | -69,1  |
|       |       |      |                                   |               | $\Sigma = +2,070$ | 0,2295            |                        |        |

Los pasos de los cálculos resumidos se han desarrollado en forma tabular, utilizando el Diagrama *B* para obtener las pérdidas de cargas en metros por mil metros (*S*). Los valores de  $H_L$  se obtienen por multiplicación de *S* por la longitud de la tubería que se considere. También se han tabulado los valores del coeficiente de  $H_L$  por el  $Q$  correspondiente.

Los términos  $\Delta$  se calculan [expresión (4), Problema 18] como sigue:

$$\begin{aligned}\Delta_I &= \frac{-(-1,434)}{1,85(0,0584)} = +13,3 & \Delta_{III} &= \frac{-(-7,310)}{1,85(0,1630)} = +24,2 \\ \Delta_{II} &= \frac{-(-1,140)}{1,85(0,1163)} = +5,3 & \Delta_{IV} &= \frac{-(-2,070)}{1,85(0,2295)} = -4,9\end{aligned}$$

Para la tubería *EF* y el lazo I, el término  $\Delta$  neto es ( $\Delta_I - \Delta_{III}$ ), es decir,  $[+13,3 - (+24,2)] = -10,9$ . Se observa que el  $\Delta$  para el circuito I se combina con el  $\Delta$  del circuito III ya que la tubería *EF* pertenece a los dos lazos. En forma análoga, la tubería *EF* como perteneciente al lazo III, el término  $\Delta$  neto es ( $\Delta_{III} - \Delta_I$ ), es decir,  $[+24,2 - (+13,3)] = +10,9$ . Obsérvese que los valores  $\Delta$  netos tienen el mismo valor absoluto, pero *signo opuesto*. Esto se comprende fácilmente ya que el flujo en la tubería *EF* es contrario al de las agujas de un reloj en el circuito I, mientras que en el lazo III es del sentido de las agujas de un reloj.

Los valores de los  $Q_2$  para la segunda aproximación se calculan así:

$$Q_{AB} = (160,0 + 13,3) = 173,3 \text{ l/seg}$$

mientras que

$$Q_{EF} = (-80,0 - 10,9) = -90,9 \text{ l/seg} \quad \text{y} \quad Q_{FA} = (-240,0 + 13,3) = -226,7 \text{ l/seg}$$

El método consiste en continuar las aproximaciones hasta que los términos  $\Delta$  sean lo suficientemente pequeños, de acuerdo con la precisión que se busque, recordando siempre que los valores de  $C_1$  tienen una precisión limitada. En referencia con la columna de la derecha de la última de las tablas, se hace notar que dan los valores finales de  $Q$  en las diversas tuberías.

Como las sumas de las pérdidas de carga son pequeñas para todos los circuitos pueden considerarse los valores de los caudales que figuran en la columna de la derecha de la última tabla como los valores correctos, dentro de la precisión esperada. El lector puede practicar, calculando los nuevos valores de  $\Delta$ , a continuación los  $Q_3$ , etc.

- (b) La altura piezométrica en *A* es  $(60,0 + 45,0) = 105,0$  m. La pérdida de carga de *A* a *I* puede calcularse por cualquiera de las rutas que unen *A* con *I*, sumando las pérdidas de la forma usual, es decir, en la dirección

| Tramo     | $Q_2$  | <i>S</i> | $H_L$             | $H_L/Q$ | $\Delta$                |
|-----------|--------|----------|-------------------|---------|-------------------------|
| <i>AB</i> | 173,3  | 2,70     | 2,430             | 0,0140  | + 7,2                   |
| <i>BE</i> | 48,0   | 0,70     | 0,840             | 0,0175  | + 7,2 - (-1,2) = + 8,4  |
| <i>EF</i> | -90,9  | -2,30    | -2,070            | 0,0228  | + 7,2 - (-6,4) = + 13,6 |
| <i>FA</i> | -226,7 | -1,70    | -2,040            | 0,0090  | + 7,2                   |
|           |        |          | $\Sigma = -0,840$ | 0,0633  |                         |
| <i>BC</i> | 125,3  | 1,40     | 1,260             | 0,0101  | - 1,2                   |
| <i>CD</i> | 85,3   | 2,10     | 2,520             | 0,0295  | - 1,2                   |
| <i>DE</i> | -49,8  | -3,00    | -2,700            | 0,0542  | - 1,2 - 8,9 = -10,1     |
| <i>EB</i> | -48,0  | -0,70    | -0,840            | 0,0175  | - 1,2 - 7,2 = -8,4      |
|           |        |          | $\Sigma = +0,240$ | 0,1113  |                         |
| <i>FE</i> | 90,9   | 2,30     | 2,070             | 0,0228  | - 6,4 - 7,2 = -13,6     |
| <i>EH</i> | 69,1   | 5,50     | 6,600             | 0,0955  | - 6,4 - 8,9 = -15,3     |
| <i>HG</i> | -55,8  | -0,91    | -0,819            | 0,0147  | - 6,4                   |
| <i>GF</i> | -135,8 | -4,80    | -5,760            | 0,0424  | - 6,4                   |
|           |        |          | $\Sigma = +2,091$ | 0,1754  |                         |
| <i>ED</i> | 49,8   | 3,00     | 2,700             | 0,0542  | + 8,9 - (-1,2) = + 10,1 |
| <i>DI</i> | 35,1   | 1,61     | 1,932             | 0,0550  | + 8,9                   |
| <i>IH</i> | -44,9  | -2,50    | -2,250            | 0,0501  | + 8,9                   |
| <i>HE</i> | -69,1  | -5,50    | -6,600            | 0,0955  | + 8,9 - (-6,4) = + 15,3 |
|           |        |          | $\Sigma = -4,218$ | 0,2548  |                         |

del flujo. Utilizando el camino *ABEHI* se obtiene  $(H_L)_{A,I} = (2,520 + 1,116 + 4,200 + 1,440) = 9,276$  m. Como comprobación, al utilizar la ruta *ABEDI*,  $H_L = (2,520 + 1,116 + 3,780 + 3,000) = 10,416$  m. Utilizando el valor 9,8 m, la altura piezométrica en *I* será  $= (105,0 - 9,8) = 95,2$  m. De aquí, la altura de presión en *I*  $= (95,2 - 30,0) = 65,2$  m.

| Tramo     | $Q_3$  | $S$   | $H_L$             | $H_L/Q$ | $\Delta$             | $Q_4$  |
|-----------|--------|-------|-------------------|---------|----------------------|--------|
| <i>AB</i> | 180,5  | 2,80  | 2,520             | 0,0140  | -1,1                 | 179,4  |
| <i>BE</i> | 56,4   | 0,93  | 1,116             | 0,0198  | -1,1 - 4,9 = -6,0    | 50,4   |
| <i>EF</i> | -77,3  | -1,76 | -1,584            | 0,0205  | -1,1 - 4,8 = -5,9    | -83,2  |
| <i>FA</i> | -219,5 | -1,60 | -1,920            | 0,0087  | -1,1                 | -220,6 |
|           |        |       | $\Sigma = +0,132$ | 0,0630  |                      |        |
| <i>BC</i> | 124,1  | 1,41  | 1,269             | 0,0102  | +4,9                 | 129,0  |
| <i>CD</i> | 84,1   | 2,10  | 2,520             | 0,0300  | +4,9                 | 89,0   |
| <i>DE</i> | -59,9  | -4,20 | -3,780            | 0,0631  | +4,9 - (-2,5) = +7,4 | -52,5  |
| <i>EB</i> | -56,4  | -0,93 | -1,116            | 0,0198  | +4,9 - (-1,1) = +6,0 | -50,4  |
|           |        |       | $\Sigma = -1,107$ | 0,1231  |                      |        |
| <i>FE</i> | 77,3   | 1,76  | 1,584             | 0,0205  | +4,8 - (-1,1) = +5,9 | 83,2   |
| <i>EH</i> | 53,8   | 3,50  | 4,200             | 0,0781  | +4,8 - (-2,5) = +7,3 | 61,1   |
| <i>HG</i> | -62,2  | -1,20 | -1,080            | 0,0174  | +4,8                 | -57,4  |
| <i>GF</i> | -142,2 | -5,10 | -6,120            | 0,0430  | +4,8                 | -137,4 |
|           |        |       | $\Sigma = -1,416$ | 0,1590  |                      |        |
| <i>ED</i> | 59,9   | 4,20  | 3,780             | 0,0631  | -2,5 - 4,9 = -7,4    | 52,5   |
| <i>DI</i> | 44,0   | 2,50  | 3,000             | 0,0682  | -2,5                 | 41,5   |
| <i>IH</i> | -35,1  | -1,60 | -1,440            | 0,0410  | -2,5                 | -37,6  |
| <i>HE</i> | -53,8  | -3,50 | -4,200            | 0,0781  | -2,5 - 4,8 = -7,3    | -61,1  |
|           |        |       | $\Sigma = +1,140$ | 0,2504  |                      |        |

## Problemas propuestos

- 21 Mediante el Diagrama *B*, calcular el caudal esperado en una tubería de 40 cm si la línea de alturas piezométricas cae 1,10 m en 1 kilómetro. (Utilizar  $C_1 = 100$ .) *Sol.* 62 l/seg
- 22 Si la tubería del Problema 21 fuera de fundición nueva, ¿cuál sería el caudal? *Sol.* 80,6 l/seg
- 23 En el ensayo de una tubería de fundición de 50 cm, el caudal en flujo permanente fue de 175 l/seg y la línea de alturas piezométricas cayó 1,20 m en un tramo de tubería de 600 m. ¿Cuál es el valor de  $C_1$ ? *Sol.* 116
- 24 ¿Qué diámetro debe de tener una tubería nueva de fundición para transportar, en régimen permanente, 550 l/seg de agua a través de una longitud de 1800 m con una pérdida de carga de 9 m? *Sol.* 62 cm
- 25 Se quieren transportar 520 l/seg a través de una tubería de fundición vieja ( $C_1 = 100$ ) con una pendiente de la línea de alturas piezométricas de 1,0 m/1000 m. Teóricamente, ¿qué número de tuberías de 40 cm serán necesarias?, ¿y de 50 cm?, ¿y de 60 cm?, ¿y de 90 cm? *Sol.* 8,97, 5,07, 3,06, 1
- 26 Comprobar las relaciones del Problema 25 cuando se transportan 520 l/seg para una pendiente cualquiera de la línea de alturas piezométricas.
- 27 ¿Qué pérdida de carga producirá en una tubería nueva de fundición de 40 cm un caudal que, en una tubería de fundición de 50 cm, también nueva, da lugar a una caída de la línea de alturas piezométricas de 1,0 m/1000 m? *Sol.* 2,90 m/1000 m

28. La tubería compuesta (sistema de tuberías en serie)  $ABCD$  está constituida por 6000 m de tubería de 40 cm y 3000 m de 30 cm y 1500 m de 20 cm ( $C_1 = 100$ ). (a) Calcular el caudal cuando la pérdida de carga entre  $A$  y  $B$  es de 60 m. (b) ¿Qué diámetro ha de tener una tubería de 1500 m de longitud, colocada en paralelo con la existente de 20 cm y con nudos en  $C$  y  $D$ , para que la nueva sección  $C-D$  sea equivalente a la sección  $ABC$  (utiliza  $C_1 = 100$ ). (c) Si entre los puntos  $C$  y  $D$  se pone en paralelo con la tubería de 20 cm  $CD$  otra de 30 cm 2400 m de longitud, ¿cuál será la pérdida de carga total entre  $A$  y  $D$  para  $Q = 80$  l/seg?

Sol. 58 l/seg, 16,5 cm, 42,8 m

29. Un sistema de tuberías en serie  $ABCD$  está formado por una tubería de 50 cm y 3000 m de longitud, una de 40 cm y 2400 m y otra de 30 cm y  $L$  m ( $C_1 = 120$ ). ¿Qué longitud  $L$  hará que el sistema  $ABCD$  sea equivalente a una tubería de 37,5 cm de diámetro, 4900 m de longitud y  $C_1 = 100$ ? Si la longitud de la tubería de 30 cm que va de  $C$  a  $D$  fuera de 900 m, ¿qué caudal circulará para una pérdida de carga entre  $A$  y  $D$  de 40 m?

Sol. 1320 m, 180 l/seg

30. Hallar la longitud de una tubería de 20 cm equivalente al sistema de tuberías en serie constituido por una tubería de 25 cm y 900 m de longitud, una de 20 cm y 450 m y otra de 15 cm y 150 m de longitud (para todas las tuberías  $C_1 = 120$ ). Sol. 1320 m

31. Los depósitos  $A$  y  $D$  están conectados por el siguiente sistema de tuberías en serie: la tubería ( $A-B$ ) de 50 cm y 2400 m de longitud, la ( $B-C$ ) de 40 cm y 1800 m y la ( $C-D$ ) de diámetro desconocido y 600 m de longitud. La diferencia de elevación entre las superficies libres de los depósitos es de 25 m. (a) Determinar el diámetro de la tubería  $CD$  para que el caudal que circula entre  $A$  y  $D$  sea de 180 l/seg si  $C_1 = 120$  para todas las tuberías (b) ¿Qué caudal circulará entre  $A$  y  $D$  si la tubería  $CD$  es de 35 cm de diámetro y si, además, conectada entre  $B$  y  $D$  existe otra tubería en paralelo con  $BCD$  de 2700 m de longitud y 30 cm de diámetro?

Sol. 32 cm, 258 l/seg

32. Un sistema de tuberías ( $C_1 = 120$ ) está constituido por una tubería de 75 cm y 3000 m ( $AB$ ), otra de 60 cm 2400 m ( $BC$ ) y de  $C$  a  $D$  dos tuberías en paralelo de 40 cm y 1800 m de longitud cada una. (a) Para un caudal entre  $A$  y  $D$  de 360 l/seg, ¿cuál es la pérdida de carga? (b) Si se cierra la llave en una de las tuberías de 40 cm, ¿qué variación se producirá en la pérdida de carga para el mismo caudal anterior?

Sol. 21,2 m, variación = 31,1 m

33. En la Fig. 8-13, para una altura de presión en  $D$  igual a 30 m (a) calcular la potencia comunicada a la turbina  $DE$ . (b) Si se instala la tubería dibujada a trazos en la figura (60 cm y 900 m de longitud), ¿qué potencia podrá comunicarse a la turbina si el caudal es de 540 l/seg? ( $C_1 = 120$ ). Sol. 144 CV, 207 CV

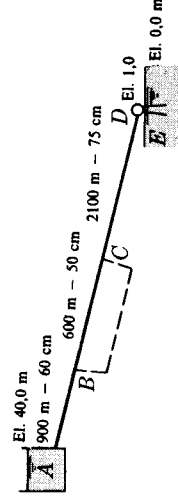


Fig. 8-13

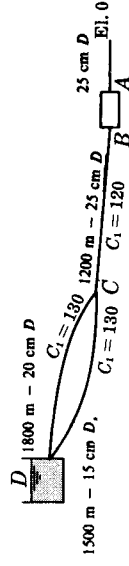


Fig. 8-14

34. En la Fig. 8-14, cuando las alturas de presión en  $A$  y  $B$  son de 3,0 m y 90,0 m, respectivamente, la bomba  $AB$  está comunicando al sistema una potencia de 100 CV. ¿Qué elevación puede mantenerse en el depósito  $D$ ? Sol. 46,8 m

35. En el sistema de tuberías mostrado en la Fig. 8-15 es necesario transportar 600 l/seg hasta  $D$ , con una presión en este punto de 2,80 kg/cm<sup>2</sup>. Determinar la presión en  $A$  en kg/cm<sup>2</sup>. Sol. 3,40 kg/cm<sup>2</sup>

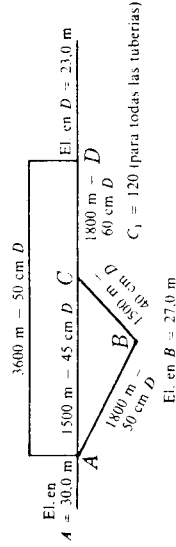


Fig. 8-15

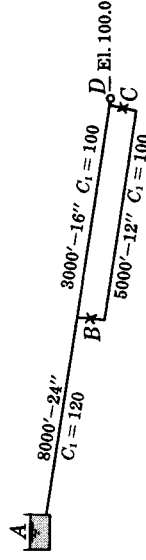


Fig. 8-16

36. (a) En la Fig. 8-16, la presión en  $D$  es de 2,10 kg/cm<sup>2</sup>, cuando el caudal suministrado desde el depósito  $A$  es de 250 l/seg. Las válvulas  $B$  y  $C$  están cerradas. Determinar la elevación de la superficie libre del depósito  $A$ . (b) E. caudal y la presión dados en (a) no se cambian, pero la válvula  $C$  está totalmente abierta y la  $B$  solo parcialmente

te abierta. Si la nueva elevación del depósito  $A$  es de 64 m, ¿cuál es la pérdida de carga a través de la válvula  $B$ ?  
*Sol.* El. 68 m, 5,8 m

37. Determinar el caudal que circula a través de cada una de las tuberías del sistema mostrado en la Figura 8-17.  
*Sol.* 190 l/seg, 140 l/seg, 50 l/seg

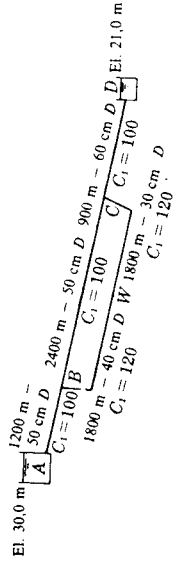


Fig. 8-17

38. La bomba  $XY$ , a una elevación de 6,0 m, hace circular 120 l/seg a través de una tubería nueva de fundición  $YW$  de 40 cm y 1800 m de longitud. La presión de descarga en  $Y$  es de 2,70 kg/cm<sup>2</sup>. En el extremo  $W$  de la tubería de 40 cm están conectadas dos tuberías, una de 30 cm y 750 m de longitud ( $C_1 = 100$ ), que termina en el depósito  $A$ , a una elevación de 30,0 m, y otra de 25 cm y 600 m ( $C_1 = 130$ ), que termina en el depósito  $B$ . Determinar la elevación de  $B$  y el caudal que llega o sale de cada uno de los depósitos.  
*Sol.* El. 7,1 m, 35 l/seg, 155 l/seg

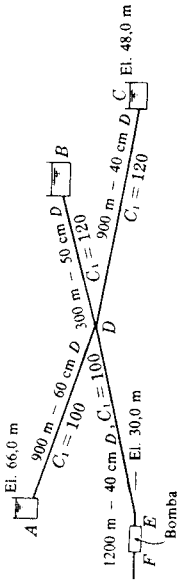


Fig. 8-18

39. En la Fig. 8-18, cuando  $Q_{ED} = Q_{DC} = 280$  l/seg, determinar la presión manométrica en  $E$ , en kg/cm<sup>2</sup>, y la elevación del depósito  $B$ .  
*Sol.* 5,26 kg/cm<sup>2</sup>, 53,9 m

40. En el sistema mostrado en la Fig. 8-19, a través de la tubería de 90 cm, circulan 900 l/seg. Determinar la potencia en CV de la bomba  $XA$  (rendimiento igual al 78,5 %) que da lugar a los caudales y elevaciones mostrados en la figura si la altura de presión en  $X$  es nula. (Dibujar las líneas de alturas piezométricas.)  
*Sol.* 272 CV

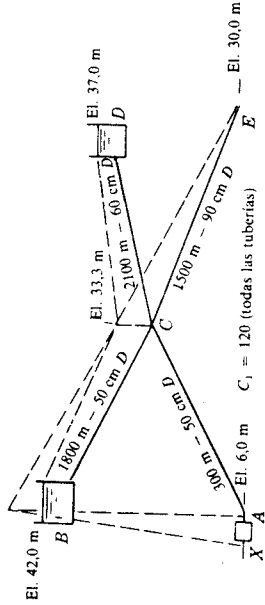


Fig. 8-19

41. ¿Qué caudal debe suministrar la bomba de la Fig. 8-20 cuando el caudal a través de la tubería de 90 cm es de 1200 l/seg y cuál es la altura de presión en  $A$ ?  
*Sol.* 984 l/seg, 56,6 m
42. La altura de presión en  $A$ , sección de descarga de la bomba  $AB$ , es 36,0 m debido a la acción de dicha bomba, de una potencia de 140 CV (véase Fig. 8-21). La pérdida de carga en la válvula  $Z$  es de 3,0 m. Determinar todos los caudales y la elevación del depósito  $T$ . Dibujar las líneas de alturas piezométricas.  
*Sol.*  $Q_{AW} = Q_{SB} = 360$  l/seg,  $Q_{SR} = 64$  l/seg,  $Q_{TS} = 424$  l/seg, El. en  $T$  27,0 m

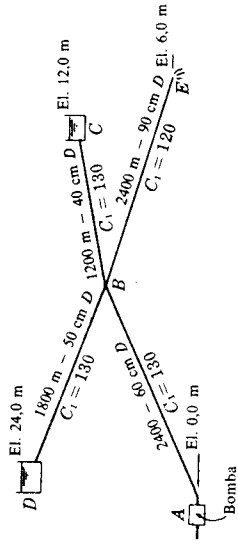


Fig. 8-20

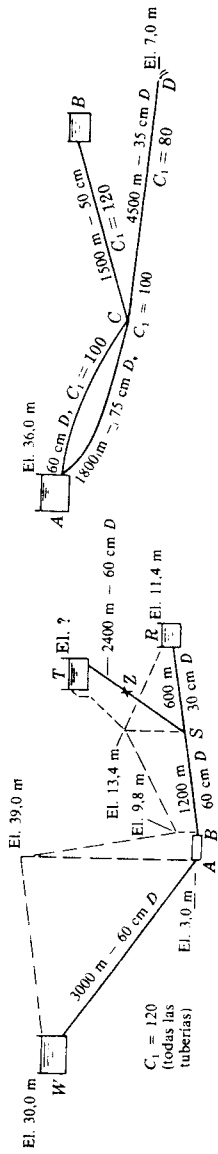


Fig. 8-21

Fig. 8-22

43. El caudal total que sale de  $A$ , véase Fig. 8-22, es de 380 l/seg y el caudal que llega a  $B$  es de 295 l/seg. Determinar (a) la elevación de  $B$  y (b) la longitud de la tubería de 60 cm.  
*Sol.* 26,5 m, 7700 m

44. ¿Cuáles son los caudales que llegan o parten de cada uno de los depósitos de la Figura 8-23?

*Sol.*  $Q_{AE} = 140$  l/seg,  $Q_{BE} = 3$  l/seg,  $Q_{EC} = 79$  l/seg,  $Q_{ED} = 64$  l/seg

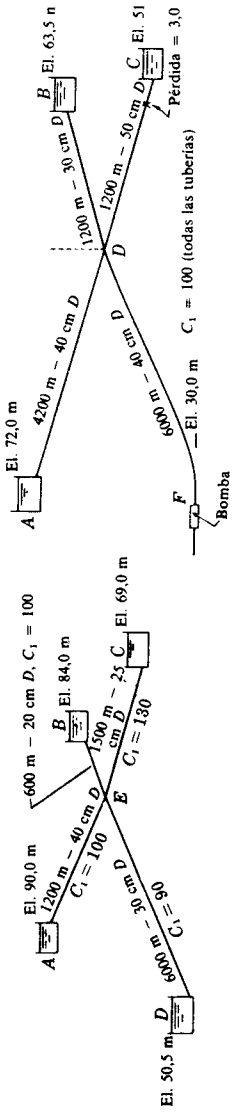


Fig. 8-23

Fig. 8-24

45. Si la altura de presión en  $F$  es de 45.0 m, determinar los caudales que circulan a través del sistema mostrado en la Figura 8-24.

*Sol.*  $Q_{FD} = 98$  l/seg,  $Q_{AD} = 104$  l/seg,  $Q_{BD} = 48$  l/seg,  $Q_{DC} = 250$  l/seg

46. Si en el sistema de tuberías del Problema 9,  $Q = 200$  l/seg, ¿qué caudal circula por cada rama y cuál es la pérdida de carga? Utilizar el método de Hardy Cross.

*Sol.* 28.0 m,  $Q_{30} = 82$  l/seg,  $Q_{20} = 53$  l/seg,  $Q_{25} = 65$  l/seg

47. Resolver el Problema 35 mediante el método de Hardy Cross.

48. Se están estudiando tres sistemas de tuberías  $A$ ,  $B$  y  $C$ . ¿Cuál es el sistema de mayor capacidad? Utilizar  $C_1 =$  para todas las tuberías del dibujo. *Sol.*  $B$

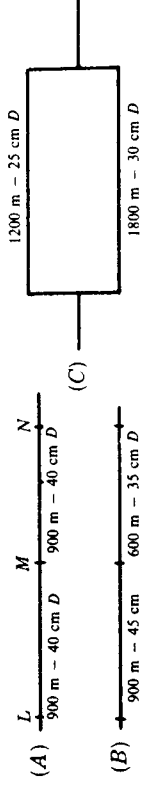


Fig. 8-25

49. En el problema precedente, ¿qué diámetro debe tener una tubería de 900 m de longitud para que puesta en paralelo entre  $M$  y  $N$ , en el sistema  $A$  (de manera que se forme un lazo o circuito de  $M$  a  $N$ ), haga que el sistema  $A$  modificado tenga el 50 % más de capacidad que el sistema  $C$ ? *Sol.* 38 cm

# Capítulo 9

## Medidas en flujo de fluidos

### INTRODUCCION

Para medidas en el flujo de fluidos se emplean en la práctica de ingeniería numerosos dispositivos. Las medidas de velocidad se realizan con tubos de Pitot, medidores de corriente y anemómetros rotativos y de hilo caliente. En estudios de modelos se utilizan con frecuencia métodos fotográficos. Las medidas se llevan a cabo mediante orificios, tubos, toberas o boquillas, venturímetros y canales Venturi, medidores de codo, vertederos de aforo, numerosas modificaciones de los precedentes y varios medidores patentados. A fin de aplicar correctamente estos aparatos, es imperativo emplear la ecuación de Bernoulli y conocer las características y coeficientes de cada aparato. En ausencia de valores seguros de estos coeficientes, un aparato debe calibrarse para las condiciones de operación en que va a emplearse.

Las fórmulas desarrolladas para fluidos incompresibles pueden aplicarse a fluidos compresibles en donde la presión diferencial es pequeña en comparación con la presión total. En muchos casos prácticos se dan tales presiones diferenciales pequeñas. Sin embargo, cuando se debe considerar la compresibilidad, se desarrollarán y se emplearán fórmulas especiales (véanse Problemas 5-8 y 23-28).

### TUBO DE PITOT

El tubo de Pitot mide la velocidad en un punto en virtud del hecho de que el tubo mide la presión de estancamiento, la cual supera a la presión estática local en  $w(V^2/2g)$  kg/m<sup>2</sup>. En una corriente de fluido abierta, como la presión manométrica local es cero, la altura a la cual el líquido asciende en el tubo coincide con la altura de velocidad. Los Problemas 1 y 5 desarrollan expresiones para el flujo de fluidos incompresibles y compresibles, respectivamente.

### COEFICIENTE DE DESCARGA

El coeficiente de descarga ( $c$ ) es la relación entre el caudal real que pasa a través del aparato y el caudal ideal. Este coeficiente se expresa así

$$c = \frac{\text{caudal real } Q \text{ en m}^3/\text{seg}}{\text{caudal ideal } Q \text{ en m}^3/\text{seg}} = \frac{Q}{A\sqrt{2gH}} \quad (1)$$

Más prácticamente, cuando el coeficiente de descarga  $c$  se ha determinado experimentalmente,

$$Q = cA\sqrt{2gH} \quad \text{en m}^3/\text{seg} \quad (2)$$

donde  $A$  = área de la sección recta del dispositivo en m<sup>2</sup>

$H$  = carga total que produce el flujo en m del fluido.

El coeficiente de descarga puede escribirse también en función del coeficiente de velocidad y del coeficiente de contracción, o sea,

$$c = c_v \times c_c \quad (3)$$



El coeficiente de descarga no es constante. Para un dispositivo dado, varía con el número de Reynolds. En el Apéndice se dan los datos siguientes:

- (1) La Tabla 7 contiene los coeficientes de descarga para orificios circulares en el caso de agua a 15° C evacuándola en la atmósfera. Para fluidos dentro de amplios márgenes del número de Reynolds, estos datos son utilizables con poca garantía.
- (2) El Diagrama C indica la variación de  $c'$  con el número de Reynolds para tres relaciones diámetro de orificio-diámetro de tubería. Para números de Reynolds aproximadamente inferiores a 10.000, estos datos no ofrecen garantía.
- (3) El Diagrama D muestra la variación de  $c$  con el número de Reynolds para tres relaciones diámetro de boquilla-diámetro de tubería (boquillas de aforo).
- (4) El Diagrama E indica la variación de  $c$  con el número de Reynolds para cinco dimensiones de venturímetros cuya relación de diámetros es de 0,500.

### COEFICIENTE DE VELOCIDAD

El coeficiente de velocidad ( $c_v$ ) es la relación entre la velocidad media real en la sección recta de la corriente (chorro) y la velocidad media ideal que se tendría sin rozamiento. Así, pues,

$$c_v = \frac{\text{velocidad media real en m/seg}}{\text{velocidad media ideal en m/seg}} = \frac{V}{\sqrt{2gH}} \quad (4)$$

### COEFICIENTE DE CONTRACCION

El coeficiente de contracción ( $c_c$ ) es la relación entre el área de la sección recta contraída de una corriente (chorro) y el área del orificio a través del cual fluye el fluido. Entonces,

$$c_c = \frac{\text{área del chorro}}{\text{área del orificio}} = \frac{A_{ch}}{A_o} \quad (5)$$

### PERDIDA DE CARGA

La pérdida de carga en orificios, tubos, toberas o boquillas y venturímetros se expresa así:

$$\text{Pérdida de carga en m del fluido} = \left(\frac{1}{c_v^2} - 1\right) \frac{V_{ch}^2}{2g} \quad (6)$$

Cuando esta expresión se aplica a un venturímetro,  $V_{ch}$  = velocidad en la garganta y  $c_v = c$ .

### VERTEDEROS DE AFORO

Los vertederos de aforo miden el caudal de líquidos en canales abiertos, corrientemente agua. Un cierto número de fórmulas empíricas se emplean en la literatura técnica, todas ellas con sus limitaciones. A continuación se citan solamente algunas de ellas. La mayoría de los vertederos son rectangulares: el *vertedero sin contracción* lateral de la lámina y generalmente empleado para grandes caudales, y el *vertedero con contracción* lateral de la lámina para caudales pequeños. Otros vertederos son triangulares, trapezoidales, parabólicos y de flujo proporcional. Para obtener resultados precisos un vertedero debe calibrarse en el lugar de utilización bajo las condiciones en que va a ser empleado.

**FORMULA TEORICA DE UN VERTEDERO**

La fórmula teórica de un vertedero para vertederos rectangulares, desarrollada en el Problema 29, es

$$Q = \frac{2}{3}cb\sqrt{2g}\left[\left(H + \frac{V^2}{2g}\right)^{3/2} - \left(\frac{V^2}{2g}\right)^{3/2}\right] \quad (7)$$

donde  $Q$  = caudal en m<sup>3</sup>/seg

$c$  = coeficiente (a determinar experimentalmente)

$b$  = anchura de la cresta del vertedero en m

$H$  = carga sobre el vertedero en m (altura de la superficie del nivel del líquido por encima de la cresta)

$V$  = velocidad media de aproximación en m/seg

**FORMULA DE FRANCIS**

La fórmula de Francis, basada en experiencias sobre vertederos rectangulares de 1,067 m (3,5 ft) a 5,182 m (17 ft) de anchura bajo cargas de 0,183 m (0,6 ft) a 0,488 m (1,6 ft), es:

$$Q = 1,84\left(b - \frac{nH}{10}\right)\left[\left(H + \frac{V^2}{2g}\right)^{3/2} - \left(\frac{V^2}{2g}\right)^{3/2}\right] \quad (8)$$

donde la notación es la misma que anteriormente y

$n = 0$  para un vertedero sin contracción

$n = 1$  para un vertedero con contracción en un extremo

$n = 2$  para un vertedero con contracción total.

**FORMULA DE BAZIN**

La fórmula de Bazin (anchuras de 0,5 m a 2 m bajo cargas de 0,05 m a 0,6 m) es:

$$Q = \left(1,794 + \frac{0,0133}{H}\right)\left[1 + 0,55\left(\frac{H}{H+Z}\right)^2\right]bH^{3/2} \quad (9)$$

donde  $Z$  = altura de la cresta del vertedero sobre la solera del canal.

El término entre corchetes se hace despreciable para bajas velocidades de aproximación.

**FORMULA DE FTELEY Y STEARNS**

La fórmula de Fteley y Stearns [anchura de 1,524 m (5 ft) a 5,791 m (19 ft)] bajo cargas de 0,021 m (0,07 ft) a 0,497 m (1,63 ft) para vertederos sin contracción es:

$$Q = 1,83b\left(H + \alpha\frac{V^2}{2g}\right)^{3/2} + 0,00065b \quad (10)$$

donde  $\alpha$  = factor dependiente de la altura de cresta  $Z$  (se requiere una tabla de valores).

**FORMULA DEL VERTEDERO TRIANGULAR (desarrollada en el Problema 30)**

Esta fórmula es:

$$Q = \frac{8}{15}c \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \sqrt{2g} H^{5/2} \quad (11)$$

o, para un vertedero dado,

$$Q = mH^{5/2} \quad (12)$$

**LA FORMULA DEL VERTEDERO TRAPEZOIDAL (de Cipolletti) es:**

$$Q = 1,861bH^{3/2} \quad (13)$$

En este vertedero la pendiente de los lados (extremidades) es de 1 horizontal a 4 vertical.

## PARA PRESAS EMPLEADAS COMO VERTEDEROS la expresión aproximada del caudal es

$$Q = mbH^{3/2} \quad (14)$$

donde  $m$  = factor experimental, tomado generalmente de estudios sobre modelos.

En el Capítulo 10, Problema 52, se discute el caso de flujo no uniforme en vertederos de pared gruesa

## EL TIEMPO DE VACIADO DE DEPOSITOS por medio de un orificio es (véase Problema 38)

$$t = \frac{2A_T}{cA_o\sqrt{2g}} (h_1^{1/2} - h_2^{1/2}) \quad (\text{sección recta constante, sin flujo entrante}) \quad (15)$$

$$t = \int_{h_1}^{h_2} \frac{-A_T dh}{Q_{\text{sat}} - Q_{\text{en}}} \quad (\text{flujo de entrada} < \text{flujo de salida, sección recta constante}) \quad (16)$$

Para un depósito cuya sección recta no es constante, véase el Problema 41.

## EL TIEMPO DE VACIADO DE DEPOSITOS por medio de vertederos se calcula empleando la fórmula (véase Problema 43):

$$t = \frac{2A_T}{mL} (H_2^{-1/2} - H_1^{-1/2}) \quad (17)$$

## EL TIEMPO PARA ESTABLECER EL FLUJO en una tubería es (véase Problema 45):

$$t = \frac{LV_f}{2gH} \ln \left( \frac{V_f + V}{V_f - V} \right) \quad (18)$$

## Problemas resueltos

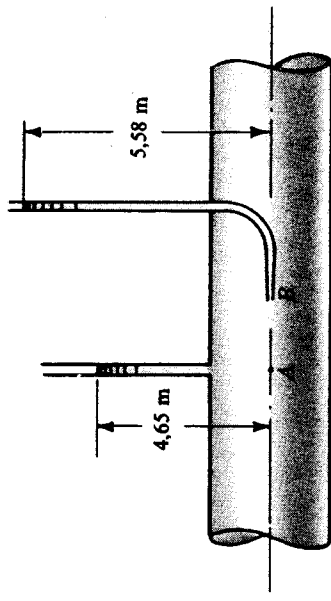
1. Un tubo de Pitot, teniendo un coeficiente de 0,98, se emplea para medir la velocidad del agua en el centro de una tubería. La altura de presión de estancamiento es 5,58 m y la altura de presión estática en la tubería es de 4,65 m. ¿Cuál es la velocidad?

### Solución:

Si el tubo se adapta y posiciona correctamente, un punto de velocidad cero (punto de estancamiento) se desarrolla en  $B$  enfrente del extremo abierto del tubo (véase Fig. 9-1). Aplicando el teorema de Bernoulli desde  $A$  en el líquido en reposo hasta  $B$  se tiene

$$\left( \frac{p_A}{w} + \frac{V_A^2}{2g} + 0 \right) - \text{sin pérdidas (supuesto)} = \left( \frac{p_B}{w} + 0 + 0 \right) \quad (1)$$

Fig. 9-1



Entonces, para un fluido ideal «desprovisto» de fricción,

$$\frac{V_A^2}{2g} = \frac{p_B}{w} - \frac{p_A}{w} \quad \text{o} \quad V_A = \sqrt{2g \left( \frac{p_B}{w} - \frac{p_A}{w} \right)} \quad (2)$$

Para el tubo real debe introducirse un coeficiente  $c$  que depende de la forma del tubo. La velocidad real para el problema anterior sería

$$V_A = c\sqrt{2g(p_B/w - p_A/w)} = 0,98\sqrt{2g(5,58 - 4,65)} = 4,18 \text{ m/seg}$$

La ecuación anterior se aplica a todos los fluidos incompresibles. El valor de  $c$  puede tomarse como la mitad en la mayoría de los problemas de ingeniería. Resolviendo (1) para la presión de estancamiento en  $B$  se tiene

$$p_B = p_A + \frac{1}{2}\rho V^2 \quad \text{donde } \rho = w/g \quad (3)$$

2. A través de un conducto fluye aire, y el tubo de Pitot estático que mide la velocidad está conectado a un manómetro diferencial conteniendo agua. Si la desviación del manómetro es 10 cm, calcular la velocidad del aire, suponiendo que el peso específico del aire es constante e igual a 1,22 kg/m<sup>3</sup> y que el coeficiente del tubo es 0,98.

**Solución:**

Para el manómetro diferencial,

$$(p_B - p_A)/w = (10/100)(1000/1,22) = 82 \text{ m aire.} \quad \text{Entonces, } V = 0,98\sqrt{19,6(82)} = 39,3 \text{ m/seg}$$

(Véanse los Problemas 26-28 y Capítulo 11 para consideraciones sobre velocidad del sonido.)

3. Por una tubería fluye tetracloruro de carbono ( $D_r = 1,60$ ). El manómetro diferencial conectado al tubo de Pitot estático indica una desviación de 7,5 cm de mercurio. Suponiendo  $c = 1,00$ , hallar la velocidad.

**Solución:**

$$p_B - p_A = (7,5/100)(13,6 - 1,6)1000 = 900 \text{ kg/m}^2 \quad V = \sqrt{19,6[900/(1,6 \times 1000)]} = 3,31 \text{ m/seg}$$

4. Fluye agua a una velocidad de 1,4 m/seg. Un manómetro diferencial que contiene un líquido cuya densidad relativa es 1,25 se conecta a un tubo de Pitot estático. ¿Cuál es la diferencia de nivel del fluido en el manómetro?

**Solución:**

$$V = c\sqrt{2g(\Delta p/w)}, \quad 1,4 = 1,00\sqrt{19,6(\Delta p/w)} \quad \text{y} \quad \Delta p/w = 0,1 \text{ m agua}$$

Aplicando el principio de los manómetros diferenciales,  $0,1 = (1,25 - 1)h$  y  $h = 0,4 \text{ m}$  de diferencia.

5. Desarrollar la expresión para medir el flujo de un gas con un tubo de Pitot.

**Solución:**

El flujo de  $A$  a  $B$  en la figura del Problema 1 anterior puede considerarse adiabático y con pérdidas despreciables. Aplicando la ecuación de Bernoulli  $D$  del Problema 20 del Capítulo 6, desde  $A$  hasta  $B$ , obtenemos

$$\left[ \left( \frac{k}{k-1} \right) \frac{p_A}{w_A} + \frac{V_A^2}{2g} + 0 \right] - \text{pérdidas despreciables} = \left[ \left( \frac{k}{k-1} \right) \left( \frac{p_B}{w_B} \right) \left( \frac{p_B}{p_A} \right)^{1/(k-1)} + 0 + 0 \right] \quad (1)$$

$$0 \quad \quad \quad \frac{V_A^2}{2g} = \left( \frac{k}{k-1} \right) \left( \frac{p_A}{w_A} \right) \left[ \left( \frac{p_B}{p_A} \right)^{1/(k-1)} - 1 \right] \quad (2)$$

El término  $p_B$  es la presión de estancamiento. Esta expresión (1) corrientemente se transforma introduciendo la relación entre la velocidad en  $A$  y la velocidad del sonido  $c$  del fluido no perturbado.

Del Capítulo 1, la velocidad del sonido  $c = \sqrt{E/\rho} = \sqrt{k p/\rho} = \sqrt{k p g/w}$ . Combinando con la ecuación (1) precedente,

$$\frac{V_A^2}{2} = \left( \frac{c^2}{k-1} \right) \left[ \left( \frac{p_B}{p_A} \right)^{1/(k-1)} - 1 \right] \quad \text{o,} \quad \frac{p_B}{p_A} = \left[ 1 + \left( \frac{V_A^2}{2c^2} \right) \right]^{k/(k-1)} \quad (2)$$

Desarrollando en serie,

$$\frac{p_B}{p_A} = 1 + \frac{k}{2} \left( \frac{V_A}{c} \right)^2 \left[ 1 + \frac{1}{4} \left( \frac{V_A}{c} \right)^2 - \frac{k-2}{24} \left( \frac{V_A}{c} \right)^4 + \dots \right] \quad (3)$$

A fin de comparar esta expresión con la fórmula (3) del Problema 1, se multiplica por  $p_A$  y se sustituye  $kp_A$  por  $\rho_A$ , obteniéndose

$$p_B = p_A + \frac{1}{2} \rho_A V_A^2 \left[ 1 + \frac{1}{4} \left( \frac{V_A}{c} \right)^2 - \frac{k-2}{24} \left( \frac{V_A}{c} \right)^4 + \dots \right]$$

Las expresiones anteriores se aplican a todos los fluidos compresibles para relaciones de  $V/c$  menores que la unidad. Para relaciones mayores que la unidad, se producen ondas de choque y otros fenómenos, no teniendo suficiente precisión la hipótesis adiabática y, por consiguiente, la aplicación de estas expresiones. La relación 1 se denomina *número de Mach*.

El término entre corchetes en (4) es mayor que la unidad y los dos primeros términos dan suficiente aproximación. El efecto de la compresibilidad es incrementar la presión del punto de estancamiento respecto a la un fluido incompresible [véase expresión (3) del Problema 1].

En los Problemas 26-28 y en el Capítulo 11 se discutirá el caso de velocidades del sonido.

6. Mediante un tubo de Pitot se mide un flujo de aire en condiciones atmosféricas ( $w = 1,221 \text{ kg/t}$  a  $15^\circ \text{ C}$ ) a una velocidad de  $90 \text{ m/seg}$ . Calcular el error en la presión de estancamiento al suponer incompresible el aire.

**Solución:**

Aplicando la fórmula (3) del Problema 1 anterior,

$$p_B = p_A + \frac{1}{2} \rho V^2 = 1,033(10.000) + \frac{1}{2}(1,221/9,8)(90)^2 = 10.836 \text{ kg/m}^2 \text{ absolutos}$$

Aplicando la fórmula (4) del Problema 5 anterior y haciendo  $c = \sqrt{kgRT} = \sqrt{1,4(9,8)(29,3)(288)} = 340 \text{ m/seg}$

$$\begin{aligned} p_B &= 1,033(10.000) + \frac{1}{2}(1,221/9,8)(90)^2 \left[ 1 + \frac{1}{4} (90/340)^2 \dots \right] \\ &= 10.330 + 506 \left[ 1 + 0,0175 \right] = 10.842 \text{ kg/m}^2 \text{ absolutos} \end{aligned}$$

El error en la presión de estancamiento es menor que el  $0,1 \%$  y el error en  $(p_B - p_A)$  es aproximadamente  $1,75 \%$ .

7. La diferencia entre la presión de estancamiento y la presión estática medida por el tubo de Pitot estático es  $2000 \text{ kg/m}^2$ . La presión estática es  $1 \text{ kg/cm}^2$  absoluto y la temperatura de la corriente de aire es  $15^\circ \text{ C}$ . ¿Cuál es la velocidad del aire, (a) suponiendo que el aire es compresible y (b) suponiendo que es incompresible?

**Solución:**

$$(a) \quad p_A = 1(10.000) = 10.000 \text{ kg/m}^2 \text{ absolutos y } c = \sqrt{kgRT} = \sqrt{1,4(9,8)(28,3)(288)} = 340 \text{ m/seg.}$$

$$\text{De la ecuación (2) del Prob. 5,} \quad \frac{p_B}{p_A} = \left[ 1 + \left( \frac{k-1}{2} \right) \left( \frac{V_A}{c} \right)^2 \right]^{k/(k-1)}$$

$$\frac{10.000 + 2000}{10.000} = \left[ 1 + \left( \frac{1,4-1}{2} \right) \left( \frac{V_A}{340} \right)^2 \right]^{1,4/0,4}, \quad V_A = 178 \text{ m/seg}$$

$$(b) \quad w = \frac{1(10.000)}{29,3(288)} = 1,186 \text{ kg/m}^3 \quad y \quad V = \sqrt{2g(p_B/w - p_A/w)} = \sqrt{2g(2000/1,186)} = 182 \text{ m/seg.}$$

8. A través de un conducto circula aire a  $240 \text{ m/seg}$ . En condiciones normales de presión, la presión manométrica de estancamiento es de  $-1,71 \text{ m}$  de columna de agua. La temperatura de estancamiento es de  $63^\circ \text{ C}$ . ¿Cuál es la presión estática en el conducto?

**Solución:**

Con dos incógnitas en la ecuación (2) del Problema 5, vamos a suponer una velocidad  $V/c$  (número de Mach) igual a  $0,72$ . Entonces,

$$(-1,71 + 10,33)1000 = p_A \left[ 1 + \frac{1}{2} (1,4 - 1) (0,72)^2 \right]^{1,4/0,4}$$

$$y \quad p_A = 8,62(1000)/1,4 = 6155 \text{ kg/m}^2 \text{ absolutos.}$$

A fin de comprobar la suposición anterior, aplicamos la relación adiabática

$$\frac{T_B}{T_A} = \left(\frac{p_B}{p_A}\right)^{(k-1)/k}, \quad \frac{273 + 63}{T_A} = \left(\frac{8,62 \times 1000}{6155}\right)^{0,4/1,4}, \quad T_A = 305^\circ \text{ Kelvin}$$

Por otra parte  $c = \sqrt{kgRT} = \sqrt{1,4(9,8)(29,3)(305)} = 350 \text{ m/seg.}$

Entonces,  $V/c = 240/350 = 0,686$  y  $p_A = \frac{8,62 \times 1000}{[1 + 0,2(0,686)^2]^{1,4/0,4}} = 6285 \text{ kg/m}^2 \text{ absolutos.}$

No se precisa nueva aproximación.

9. Un orificio normal de 10 cm de diámetro evacua agua bajo una altura de carga de 6 m. ¿Cuál es el caudal en  $\text{m}^3/\text{seg}$ ?

**Solución:**

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre  $A$  y  $B$  en la figura adjunta, tomando  $B$  como plano de referencia,

$$(0 + 0 + 6) - \left(\frac{1}{2} - 1\right) \frac{V_{ch}^2}{c_v^2} = \left(\frac{V_{ch}^2}{2g} + \frac{p_B}{w} + 0\right)$$

Pero la altura de presión en  $B$  es cero (según se vio en el Cap. 4, Prob. 6). Entonces,

$$V_{ch} = c_v \sqrt{2g \times 6}$$

Por otra parte,  $Q = A_{ch} V_{ch}$  que, aplicando las definiciones de los coeficientes, da

$$Q = (c_c A_o) c_v \sqrt{2g \times 6} = c A_o \sqrt{2g \times 6}$$

De la Tabla 7,  $c = 0,594$  para  $D = 10 \text{ cm}$  y  $h = 6 \text{ m}$ . Por consiguiente,  $Q = 0,594 \left[ \frac{1}{4} \pi (0,1)^2 \right] \sqrt{2g \times 6} = 0,051 \text{ m}^3/\text{seg.}$

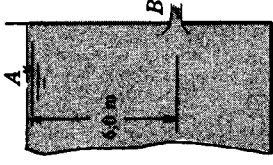


Fig. 9-2

10. La velocidad real en la sección contraída de un chorro de un líquido circulando por un orificio de 5 cm de diámetro es 8,4 m/seg bajo una carga de 4,5 m. (a) ¿Cuál es el valor del coeficiente de velocidad? (b) Si el desague medido es  $0,0114 \text{ m}^3/\text{seg}$ , determinar los coeficientes de contracción y descarga.

**Solución:**

(a) Velocidad real  $= c_v \sqrt{2gH}$ ,  $8,4 = c_v \sqrt{19,6 \times 4,5}$ ,  $c_v = 0,895$ .

(b)  $Q \text{ real} = c A_o \sqrt{2gH}$ ,  $0,0114 = c \left[ \frac{1}{4} \pi (0,05)^2 \right] \sqrt{19,6 \times 4,5}$ ,  $c = 0,627$ .

Como  $c = c_c \times c_v$ ,  $c_c = 0,627/0,895 = 0,690$ .

11. A través de un orificio normal de 2,5 cm de diámetro circula aceite bajo una carga de 5,4 m a razón de  $0,00315 \text{ m}^3/\text{seg}$ . El chorro choca contra una pared situada a 1,5 m de distancia horizontal y a 0,12 m verticalmente por debajo del centro de la sección contraída del chorro. Calcular los coeficientes.

**Solución:**

(a)  $Q = c A_o \sqrt{2gH}$ ,  $0,00315 = c \left[ \frac{1}{4} \pi (0,025)^2 \right] \sqrt{2g(5,4)}$ ,  $c = 0,625$ .

(b) De las ecuaciones cinemáticas,  $x = Vt$  e  $y = \frac{1}{2}gt^2$ , en donde  $x$  e  $y$  representan las coordenadas medidas del chorro.

Eliminando  $t$  se obtiene  $x^2 = (2V^2/g)y$ .

Sustituyendo,  $(1,5)^2 = (2V^2/9,8)(0,12)$  y  $V \text{ real} = 9,6 \text{ m/seg}$  en el chorro.

Entonces,  $9,6 = c_v = \sqrt{2g(5,4)}$  y  $c_v = 0,934$ . Finalmente,  $c_c = c/c_v = 0,670$ .

12. El depósito del Problema 9 está cerrado y el aire que ocupa el espacio por encima del agua está bajo presión, aumentando el caudal hasta  $0,075 \text{ m}^3/\text{seg}$ . Hallar la presión del aire en  $\text{kg/cm}^2$ .

**Solución:**

$$Q = cA_o\sqrt{2gH} \quad 0 \quad 0,075 = c[\frac{1}{4}\pi(0,1)^2]\sqrt{2g(6 + p/w)}$$

La Tabla 7 indica que  $c$  apenas cambia dentro del margen de carga considerado. Tomando  $c = 0,593$  y calculando, se tiene  $p/w = 7,05 \text{ m}$  de agua (el  $c$  supuesto se comprueba para la carga total  $H$ ). Entonces,

$$p' = wh/100^2 = 1000(7,05)/10.000 = 0,705 \text{ kg/cm}^2$$

13. A través de un orificio de  $7,5 \text{ m}$  de diámetro, cuyos coeficientes de velocidad y contracción son  $0,950$  y  $0,650$ , respectivamente, circula aceite de  $0,720$  de densidad relativa. ¿Qué debe leerse en el manómetro  $A$  de la Fig. 9-3 para que la potencia en el chorro  $C$  sea  $8,00 \text{ CV}$ ?

**Solución:**

La velocidad del chorro puede calcularse a partir del valor de la potencia del chorro:

$$\begin{aligned} \text{caballos de vapor del chorro} &= \frac{wQH_{ch}}{75} = \frac{w(c_c A_o V_{ch})(0 + V_{ch}^2/2g + 0)}{75} \\ 8,00 &= \frac{(0,720 \times 1000)(0,650)[\frac{1}{4}\pi(0,075)^2]V_{ch}^3/2g}{75} \end{aligned}$$

Despejando,  $V_{ch}^3 = 5700$  y  $V_{ch} = 17,8 \text{ m/seg}$ .

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre  $B$  y  $C$ , tomando  $C$  como referencia,

$$\left(\frac{p_A}{w} + \text{despr.} + 2,7\right) - \left[\frac{1}{(0,95)^2} - 1\right] \frac{(17,8)^2}{2g} = \left(0 + \frac{(17,8)^2}{2g} + 0\right)$$

y  $p_A/w = 15,25 \text{ m}$  de aceite. Entonces,  $p'_A = wh/10.000 = (0,720 \times 1000)15,25/10.000 = 1,1 \text{ kg/cm}^2$ .

*Nota:* El lector no debe confundir la altura de carga total  $H$ , que origina el flujo, con el valor de  $H_{ch}$  en la expresión que nos da la potencia del chorro. Ambos valores *no* son iguales.

14. Para el caso de la boquilla de  $10 \text{ cm}$  de diámetro indicada en la Fig. 9-4, (a) ¿Cuál es el caudal de agua a  $24^\circ \text{C}$  bajo una altura de carga de  $9 \text{ m}$ ? (b) ¿Cuál es la altura de presión en la sección  $B$ ? (c) ¿Cuál es la máxima carga que puede emplearse si el tubo está completamente lleno? (Utilizar  $c_v = 0,82$ .)

**Solución:**

Para una boquilla normal, la corriente se contrae en  $B$  aproximadamente un  $0,62$  del área del tubo. La pérdida de carga entre  $A$  y  $B$  se ha valorado en  $0,042$  veces la altura de velocidad en  $B$ .

- (a) Aplicando la ecuación de Bernoulli entre  $A$  y  $C$ , tomando  $C$  como referencia,

$$(0 + \text{despr.} + 9) - \left[\frac{1}{(0,82)^2} - 1\right] \frac{V_{ch}^2}{2g} = \left(0 + \frac{V_{ch}^2}{2g} + 0\right)$$

y  $V_{ch} = 10,88 \text{ m/seg}$ . Luego  $Q = A_{ch}V_{ch} = [1,00 \times \frac{1}{4}\pi(0,1)^2](10,88) = 0,0855 \text{ m}^3/\text{seg}$ .

- (b) Ahora, la ecuación de Bernoulli entre  $A$  y  $B$ , tomando  $B$  como referencia, nos da

$$(0 + \text{despr.} + 9) - 0,042 \frac{V_B^2}{2g} = \left(\frac{p_B}{w} + \frac{V_B^2}{2g} + 0\right) \quad (A)$$

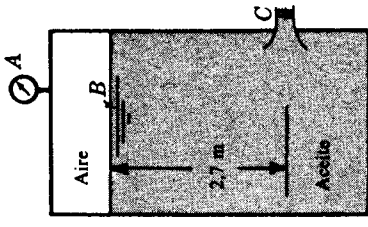


Fig. 9-3

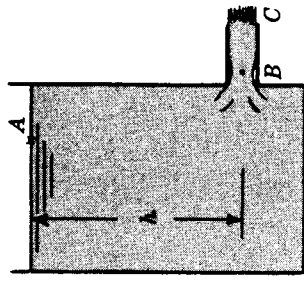


Fig. 9-4

Por otra parte,  $Q = A_B V_B = A_C V_C$  o  $c_c A V_B = A V_C$  o  $V_B = V_{ch}/c_c = 10,88/0,62 = 17,6$  m/seg.

Sustituyendo en la ecuación (A),  $9 = \frac{p_B}{w} + 1,042 \frac{(17,6)^2}{2g}$  y  $\frac{p_B}{w} = -7,5$  m de agua.

(c) Como la carga que produce el flujo a través de la boquilla se incrementa, la altura de presión en *B* irá decreciendo. Para un flujo estacionario (y con el tubo completamente lleno), la altura de presión en *B* no debe ser menor que la de la presión de vapor para líquidos a la temperatura considerada. De la Tabla 1 en el Apéndice, para el agua a 24° C este valor es de 0,030 kg/cm<sup>2</sup> absolutos o 0,3 m absolutos aproximadamente al nivel del mar (−10,0 m).

De (A) se tiene  $h = \frac{p_B}{w} + 1,042 \frac{V_B^2}{2g} = -10,0 + 1,042 \frac{V_B^2}{2g}$  (B)

Por otra parte,  $c_c A V_B = A V_C = A c_c \sqrt{2gh}$

De donde  $V_B = \frac{c_v}{c_c} \sqrt{2gh}$  o  $\frac{V_B^2}{2g} = (\frac{c_v}{c_c})^2 h = (\frac{0,82}{0,62})^2 h = 1,75h$

Sustituyendo en (B),  $h = -10,0 + 1,042(1,75h)$  y  $h = 12,15$  m de agua (24° C).

Toda carga superior a 12 m hará que la corriente salga sin tocar las paredes del tubo. El tubo funciona entonces como un orificio.

En condiciones de presión de vapor resultarían fenómenos de cavitación (véase Capítulo 12).

**15.** A través de una tubería de 10 cm circula agua a razón de 0,027 m<sup>3</sup>/seg y de ahí a través de una boquilla conectada al final de la tubería. La boquilla tiene 5 cm de diámetro interior y los coeficientes de velocidad y contracción para la boquilla son 0,950 y 0,930, respectivamente. ¿Qué altura de presión debe mantenerse en la base mayor de la boquilla si la presión que rodea al chorro es la atmosférica?

**Solución:**

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre la base mayor de la boquilla y el chorro,

$$\left( \frac{p}{w} + \frac{V_{10}^2}{2g} + 0 \right) - \left[ \frac{1}{(0,950)^2} - 1 \right] \frac{V_{ch}^2}{2g} = \left( 0 + \frac{V_{ch}^2}{2g} + 0 \right)$$

y las velocidades se calculan de  $Q = AV$ :  $0,027 = A_{10} V_{10} = A_{ch} V_{ch} = (c_c A_5) V_{ch}$ . Así, pues,

$$V_{10} = \frac{0,027}{\frac{1}{4}\pi(0,1)^2} = 3,44 \text{ m/seg} \quad \text{y} \quad V_{ch} = \frac{0,027}{0,930[\frac{1}{4}\pi(0,05)^2]} = 14,8 \text{ m/seg}$$

Sustituyendo y operando,  $p/w = 12,4 - 0,6 = 11,8$  m de agua.

Aplicando la fórmula  $V_{ch} = c_v \sqrt{2gH}$  y siendo  $H = (p/w + V_{10}^2/2g)$ , se tiene

$$14,8 = 0,950 \sqrt{2g[p/w + (3,44)^2/2g]}$$

de donde  $\sqrt{p/w + 0,6} = 3,51$  y  $p/w = 11,8$  m de agua, como antes.

**16.** Una boquilla de 10 cm de diámetro en la base mayor por 5 cm de diámetro en el extremo de salida apunta hacia abajo y la altura de presión en la base mayor de la boquilla es 7,8 m de agua. La base mayor de la boquilla dista 0,9 m de la sección de salida y el coeficiente de velocidad es 0,962. Determinar la potencia en el chorro de agua.

**Solución:**

Para una boquilla, salvo si se da  $c_c$ , este coeficiente se toma como la unidad. Por consiguiente,  $V_{ch} = V_5$ .

Antes de calcular la potencia deben hallarse  $V$  y  $Q$ . Usando la ecuación de Bernoulli entre la base mayor y la sección de salida de la boquilla, tomando como referencia esta última, tenemos

$$\left( 7,8 + \frac{V_{10}^2}{2g} + 0,9 \right) - \left[ \frac{1}{(0,962)^2} - 1 \right] \frac{V_5^2}{2g} = \left( 0 + \frac{V_5^2}{2g} + 0 \right)$$

y  $A_{10} V_{10} = A_5 V_5$  o  $V_{10}^2 = (5/10)^4 V_5^2$ . Operando,  $V_5 = 12,95$  m/seg.

$$\text{Potencia en el chorro} = \frac{wQH_{ch}}{75} = \frac{1000[\frac{1}{4}\pi(0,05)^2(12,95)][0 + (12,95)^2/2g + 0]}{75} = 2,91 \text{ CV}$$



17. Por un venturímetro de  $30 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$  circula agua a razón de  $0,0395 \text{ m}^3/\text{seg}$  y el manómetro diferencial indica una desviación de  $1,0 \text{ m}$ , como muestra la Fig. 9-5. La densidad relativa del líquido del manómetro es  $1,25$ . Determinar el coeficiente del venturímetro.

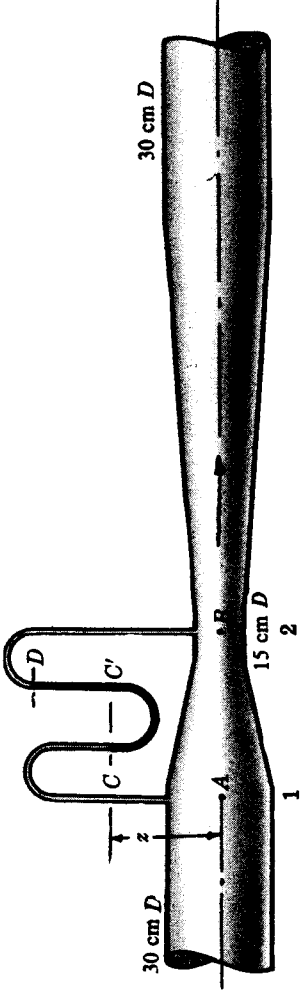


Fig. 9-5

**Solución:**

El coeficiente de un venturímetro es el mismo que el de descarga ( $c_c = 1,00$  y, por consiguiente,  $c = c_o$ ). El coeficiente de flujo  $K$  no debe confundirse con el coeficiente  $c$  del medidor. Al final de este problema se hace una aclaración.

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre  $A$  y  $B$ , caso ideal, se tiene

$$\left(\frac{p_A}{w} + \frac{V_{30}^2}{2g} + 0\right) - \sin \text{ pérdidas} = \left(\frac{p_B}{w} + \frac{V_{15}^2}{2g} + 0\right)$$

$$\text{y } V_{30}^2 = (A_{15}/A_{30})^2 V_{15}^2, \text{ Operando, } V_{15} = \sqrt{\frac{2g(p_A/w - p_B/w)}{1 - (A_{15}/A_{30})^2}} \quad (\sin \text{ pérdidas}).$$

La velocidad real (y, por tanto, el valor real del caudal  $Q$ ) se obtendrá multiplicando el valor ideal por el coeficiente  $c$  del medidor. Así, pues,

$$Q = A_{15} V_{15} = A_{15} c \sqrt{\frac{2g(p_A/w - p_B/w)}{1 - (A_{15}/A_{30})^2}} \quad (1)$$

Para obtener la altura de presión diferencial indicada anteriormente, se emplearán los principios del manómetro diferencial.

$$p_c = p_c' \\ (p_A/w - z) = p_B/w - (z + 1,0) + 1,25(1,0) \quad \text{o} \quad (p_A/w - p_B/w) = 0,25 \text{ m}$$

$$\text{Sustituyendo en (1), } 0,0395 = \frac{1}{4}\pi(0,15)^2 c \sqrt{2g(0,25)/(1 - 1/16)} \quad \text{y} \quad c = 0,980.$$

*Nota:* La ecuación (1) suele escribirse así:  $Q = K A_2 \sqrt{2g(\Delta p/w)}$  donde  $K$  es el llamado coeficiente de flujo. Está claro que

$$K = \frac{c}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \quad \text{o} \quad \frac{c}{\sqrt{1 - (D_2/D_1)^4}}$$

Para obtener, si se desea,  $c$  se utilizan tablas o ábacos en los que puede leerse el coeficiente  $K$ . Los factores de conversión para obtener los valores de  $K$  para ciertas relaciones de diámetros de instrumentos se indican en el Apéndice en varios diagramas.

18. Circula agua hacia arriba a través de un venturímetro vertical de 30 cm  $\times$  15 cm cuyo coeficiente es 0,980. La desviación del manómetro diferencial es 1,16 m de líquido de densidad relativa 1,25, como se muestra en la figura adjunta. Determinar el caudal en m<sup>3</sup>/seg.

**Solución:**

Aplicando la ecuación de Bernoulli como en el Problema 17 y teniendo en cuenta que en este caso  $z_A = 0$  y  $z_B = 0,45$  m, se tiene

$$Q = cA_{1,5} \sqrt{\frac{2g[(p_A/w - p_B/w) - 0,45]}{1 - (1/2)^4}}$$

Aplicando los principios del manómetro diferencial para obtener  $\Delta p/w$ ,

$$p_C/w = p_B/w \quad (\text{en m de agua})$$

$$p_A/w + (n + 1,16) = p_B/w + m + 1,25(1,16)$$

$$[(p_A/w - p_B/w) - (m - n)] = 1,16(1,25 - 1,00)$$

$$[(p_A/w - p_B/w) - 0,45] = 2,29 \text{ m de agua}$$

Sustituyendo en la ecuación que da el caudal, se tiene  $Q = 0,980(\frac{4}{3}\pi)(0,15)^2 \sqrt{2g(0,29)/(1 - 1/16)} = 0,0426 \text{ m}^3/\text{seg.}$

19. Agua a 37° C circula a razón de 0,0142 m<sup>3</sup>/seg a través de un orificio de 10 cm de diámetro instalado en un tubo de 20 cm. ¿Cuál es la diferencia de altura de presión entre la sección contraída arriba y la sección contraída (sección de «vena contracta»)?

**Solución:**

En el Diagrama C del Apéndice se observa que  $c'$  varía con el número de Reynolds. Hay que advertir que el número de Reynolds debe calcularse para la sección recta del orificio y no para la sección contraída del chorro ni tampoco para la sección de la tubería. Este valor es

$$R_E = \frac{V_o D_o}{\nu} = \frac{(4Q/\pi D_o^2) D_o}{\nu} = \frac{4Q}{\pi D_o} = \frac{4(0,0142)}{\pi(6,87 \times 10^{-7})(0,1)} = 263.000$$

El Diagrama C para  $\beta = 0,500$  da  $c' = 0,605$ .

Aplicando el teorema de Bernoulli entre la sección de la tubería y la sección del chorro se obtiene la siguiente ecuación general para fluidos incompresibles:

$$\left(\frac{p_s}{w} + \frac{V_s^2}{2g} + 0\right) - \left[\frac{1}{c_v^2} - 1\right] \frac{V_{ch}^2}{2g} = \left(\frac{p_{ch}}{w} + \frac{V_{ch}^2}{2g} + 0\right)$$

y

$$Q = A_{20} V_{20} = (c_c A_{10}) V_{ch}$$

Sustituyendo  $V_{20}$  por  $V_{ch}$  y operando,

$$\frac{V_{ch}^2}{2g} = c_v^2 \left( \frac{p_{20}/w - p_{ch}/w}{1 - c^2(A_{10}/A_{20})^2} \right) \quad \text{o} \quad V_{ch} = c_v \sqrt{\frac{2g(p_{20}/w - p_{ch}/w)}{1 - c^2(D_{10}/D_{20})^4}}$$

$$\text{Luego} \quad Q = A_{ch} V_{ch} = (c_c A_{10}) \times c_v \sqrt{\frac{2g(p_{20}/w - p_{ch}/w)}{1 - c^2(D_{10}/D_{20})^4}} = cA_{10} \sqrt{\frac{2g(p_{20}/w - p_{ch}/w)}{1 - c^2(D_{10}/D_{20})^4}}$$

Para un orificio con velocidad de aproximación y un chorro contraído, es más conveniente escribir la ecuación de la forma

$$Q = \frac{c' A_{10}}{\sqrt{1 - (D_{10}/D_{20})^4}} \sqrt{2g(\Delta p/w)} \quad (1)$$

$$\text{o} \quad Q = K A_{10} \sqrt{2g(\Delta p/w)} \quad (2)$$

donde  $K$  es el llamado coeficiente de flujo. El coeficiente del medidor  $c'$  puede determinarse experimentalmente para una relación de diámetro de orificio a diámetro de tubería dada, o bien puede preferirse el coeficiente de flujo  $K$ .

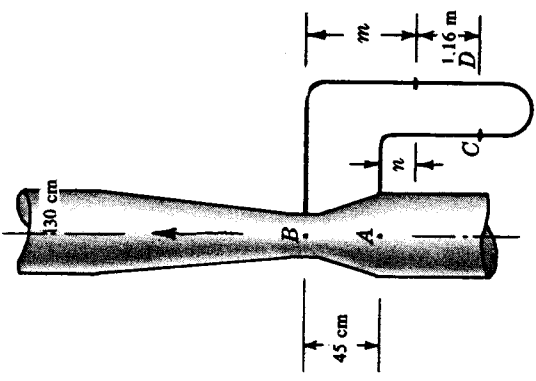


Fig. 9-6

Sustituyendo en la anterior expresión (1), se obtiene

$$0,0142 = \frac{0,605 \times \frac{1}{4}\pi(0,1)^2}{\sqrt{1 - (1/2)^4}} \sqrt{2g(\Delta p/w)} \quad \text{y} \quad \Delta p/w = (p_{20}/w - p_{ch}/w) = 0,428 \text{ m de agua.}$$

20. Para el orificio y tubería del Problema 19, ¿qué diferencia de presión en  $\text{kg/cm}^2$  causaría el mismo caudal de trementina a  $20^\circ \text{C}$ ? (Véase Apéndice para densidad relativa y  $\nu$ .)

**Solución:**

$$R_E = \frac{4Q}{\pi \nu D_o} = \frac{4(0,0142)}{\pi(0,00000173)(0,1)} = 104,500. \text{ Del Diagrama } C, \text{ para } \beta = 0,500, \quad c' = 0,607.$$

$$\text{Entonces,} \quad 0,0142 = \frac{0,607 \times \frac{1}{4}\pi(0,1)^2}{\sqrt{1 - (1/2)^4}} \sqrt{2g(\Delta p/w)}, \quad \text{de donde}$$

$$\Delta \frac{p}{w} = \left( \frac{p_{20}}{w} - \frac{p_{ch}}{w} \right) = 0,426 \text{ m de trementina} \quad \text{y} \quad \Delta p' = \frac{wh}{10,000} = \frac{(0,862 \times 1000)(0,426)}{10,000} = 0,0367 \text{ kg/cm}^2.$$

21. Determinar el caudal de agua a  $21^\circ \text{C}$  a través de un orificio de 15 cm instalado en una tubería de 25 cm si la altura de presión diferencial entre la sección aguas arriba y la sección contraída es 1,10 m de agua.

**Solución:**

Este tipo de problema ha sido tratado en el capítulo dedicado al flujo de fluidos en tuberías. El valor de  $c'$  no puede hallarse puesto que el número de Reynolds no puede calcularse. Refiriéndose al Diagrama  $C$ , para  $\beta = 0,600$ , se supondrá un valor de  $c'$  igual a 0,610. Empleando este valor,

$$Q = \frac{0,610 \times \frac{1}{4}\pi(0,15)^2}{\sqrt{1 - (0,60)^4}} \sqrt{19,6(1,10)} = 0,0536 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$\text{Entonces,} \quad R_E = \frac{4(0,0536)}{(0,000000985)(0,15)} = 462,000 \text{ (valor de tanteo)}$$

Del Diagrama  $C$ , para  $\beta = 0,600$ , se deduce  $c' = 0,609$ . Recalculando el caudal para  $c' = 0,609$  nos da  $Q = 0,0532 \text{ m}^3/\text{seg}$  (el número de Reynolds apenas queda afectado).

*Nota especial:* El profesor R. C. Binder, de la Universidad de Purdue, sugiere en las páginas 132-3 de su obra *Fluid Mechanics* (segunda edición) que este tipo de problema necesita no ser una proposición de tanteo. Propone que se dibujen líneas especiales sobre el diagrama coeficiente-número de Reynolds. En el caso de orificio en tubería, la ecuación (1) del Problema 19 puede escribirse así

$$\frac{Q}{A_{10}} = \frac{c' \sqrt{2g(\Delta p/w)}}{\sqrt{1 - (D_{10}/D_{20})^4}} = V_{10} \quad \text{ya que } Q = AV$$

$$\text{Pero} \quad R_E = \frac{V_{10} D_{10}}{\nu} = \frac{c' \sqrt{2g(\Delta p/w)} \times D_{10}}{\nu \sqrt{1 - (1/2)^4}} \quad \text{o} \quad \frac{R_E}{c'} = \frac{D_{10} \sqrt{2g(\Delta p/w)}}{\nu \sqrt{1 - (1/2)^4}}$$

o, en general,

$$\frac{R_E}{c'} = \frac{D_o \sqrt{2g(\Delta p/w)}}{\nu \sqrt{1 - (D_o/D_p)^4}}$$

En el Diagrama  $C$  se han trazado dos líneas rectas llamadas líneas  $T$ , una para  $R_E/c' = 700,000$  y otra para  $R_E/c' = 800,000$ . En el caso del Problema 21

$$\frac{R_E}{c'} = \frac{(0,15) \sqrt{19,6(1,10)}}{0,000000985 \sqrt{1 - (0,60)^4}} = 760,000$$

Con la exactitud que puede leerse, la línea 760,000 corta a la curva  $\beta = 0,600$  en  $c' = 0,609$ . El flujo  $Q$  se calcula, pues, rápidamente.

22. Una boquilla cuya sección de salida tiene 10 cm de diámetro se instala en una tubería de 25 cm. A través de la boquilla fluye fuel-oil medio a 27° C y a razón de 0,094 m<sup>3</sup>/seg. Se supone que la calibración de la boquilla está representada por la curva  $\beta = 0,4$  del Diagrama *D*. Calcular la presión diferencial leída si el líquido del manómetro tiene una densidad relativa de 13,6.

**Solución:**

La ecuación de Bernoulli, entre la sección de la tubería y la sección del chorro, conduce a la misma ecuación que se obtuvo en el Problema 17 para el venturímetro, puesto que la boquilla se diseña para un coeficiente de contracción igual a la unidad.

$$Q = A_{10} V_{10} = A_{10} c \sqrt{\frac{2g(p_A/w - p_B/w)}{1 - (10/25)^4}} \quad (1)$$

El Diagrama *D* indica que  $c$  varía con el número de Reynolds.

$$V_{10} = \frac{Q}{A_{10}} = \frac{0,094}{\frac{1}{4}\pi(0,1)^2} = 11,25 \text{ m/seg} \quad \text{y} \quad R_E = \frac{11,95 \times 0,1}{3,39 \times 10^{-6}} = 353.000$$

La curva da, para  $\beta = 0,40$ ,  $c = 0,993$ . Entonces,

$$0,094 = \frac{1}{4}\pi(0,1)^2 \times 0,993 \sqrt{\frac{2g(p_A/w - p_B/w)}{1 - (10/25)^4}}$$

y  $(p_A/w - p_B/w) = 7,25 \text{ m de fuel-oil}$ .

Empleando la Dr del fuel-oil = 0,851, tomada del Apéndice y por aplicación de los principios del manómetro diferencial, tenemos

$$7,25 = h(13,6/0,851 - 1) \quad \text{y} \quad h = 0,483 \text{ m (lectura en el manómetro)}$$

Si se da la lectura del manómetro diferencial, el procedimiento empleado en el precedente problema sería utilizar, por ejemplo, un valor supuesto de  $c$  con el que se calcularía  $Q$  y con el número de Reynolds obtenido se leería sobre la curva apropiada del Diagrama *D* un nuevo  $c$ . Si  $c$  difiere del valor supuesto, el cálculo se repite hasta encontrar el coeficiente adecuado.

23. Deducir una expresión para el caudal de un fluido compresible a través de un caudalímetro de tobera y un venturímetro.

**Solución:**

Puesto que el cambio de velocidad se produce en un corto periodo de tiempo, se sustraerá poco calor, por lo que se supondrán unas condiciones adiabáticas. El teorema de Bernoulli para un flujo compresible se ha expuesto en el Capítulo 6, ecuación (D) del Problema 20, y se expresa así:

$$\left[ \left( \frac{k}{k-1} \right) \frac{p_1}{w_1} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 \right] - H_L = \left[ \left( \frac{k}{k-1} \right) \frac{p_2}{w_2} \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \right]$$

Para un medidor de tobera y un venturímetro horizontal,  $z_1 = z_2$  y la pérdida de carga será considerada mediante el coeficiente de descarga. También, puesto que  $c_c = 1,00$ ,

$$W = w_1 A_1 V_1 = w_2 A_2 V_2 \quad (\text{kg/seg})$$

Luego  $V_1$  aguas arriba =  $W/w_1 A_1$ ,  $V_2$  aguas abajo =  $W/w_2 A_2$ . Sustituyendo y operando,

$$\frac{W^2}{w_2^2 A_2^2} - \frac{W^2}{w_1^2 A_1^2} = 2g \left( \frac{k}{k-1} \right) \left( \frac{p_1}{w_1} \right) \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} \right]$$

$$\text{o} \quad (\text{ideal}) \quad W = \frac{w_2 A_2}{\sqrt{1 - (w_2/w_1)^2 (A_2/A_1)^2}} \sqrt{\frac{2gk}{k-1} \left( \frac{p_1}{w_1} \right) \times [1 - (p_2/p_1)^{(k-1)/k}]}$$

Es más práctico eliminar  $w_2$  bajo el radical. Puesto que  $w_2/w_1 = (p_2/p_1)^{1/k}$ ,

$$(\text{ideal}) \quad W = w_2 A_2 \sqrt{\frac{2gk}{k-1} \left( \frac{p_1}{w_1} \right) \times [1 - (p_2/p_1)^{(k-1)/k}]} \quad (1)$$

El valor real de  $W$  en kg/seg se obtiene multiplicando la expresión anterior por el coeficiente  $c$ .  
 A efectos de comparación, la ecuación (1) del Problema 17 y la ecuación (1) del Problema 22 (para flujos incompresibles) pueden escribirse de la forma

$$W = wQ = \frac{wA_2 c}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{2g(\Delta p/w)}$$

$$W = wKA_2 \sqrt{2g(\Delta p/w)}$$

o

La ecuación anterior puede expresarse de una forma más general de manera que sea aplicable a flujos compresibles e incompresibles. Se introduce un factor de expansión (adiabático)  $Y$  y se especifica el valor a la entrada. La relación fundamental es entonces

$$W = w_1 KA_1 Y \sqrt{2g(\Delta p/w_1)}$$

Para fluidos incompresibles,  $Y = 1$ . Para fluidos compresibles, igualando las expresiones (1) y (2) y considerando  $Y$ , se tiene

$$Y = \sqrt{\frac{1 - (A_2/A_1)^2}{1 - (A_2/A_1)^2 (p_2/p_1)^{2/k}}} \times \frac{[k/(k-1)] \left[ 1 - (p_2/p_1)^{(k-1)/k} \right] (p_2/p_1)^{2/k}}{1 - p_2/p_1}$$

Este factor de expansión  $Y$  es una función de tres relaciones adimensionales. La Tabla 8 da algunos valores típicos para medidores de tobera y venturímetros.

**Nota:** Para orificios y medidores de orificio los valores de  $Y$  se determinarán experimentalmente; valores difieren del anterior valor de  $Y$  porque el coeficiente de contracción no es la unidad ni es una constante. Conociendo  $Y$ , las soluciones son idénticas a las que resultan para boquillas y venturímetros. Como fuentes bibliográficas se remite al lector a los experimentos realizados por H. B. Reynolds y J. A. Perry.

- 24.** Circula aire a la temperatura de  $27^\circ \text{C}$  a través de una tubería de 10 cm de diámetro y de tobera de 5 cm. La presión diferencial es de 0,160 m de aceite ( $\text{Dr} = 0,910$ ). La presión manométrica aguas arriba de la tobera es de  $2,0 \text{ kg/cm}^2$ . ¿Cuántos kilogramos por segundo circulan una lectura barométrica de  $1,03 \text{ kg/cm}^2$ , (a) suponiendo que la densidad del aire es constante (b) suponiendo unas condiciones adiabáticas?

**Solución:**

$$(a) \quad w_1 = \frac{(2,0 + 1,03)10.000}{29,3(273 + 27)} = 3,45 \text{ kg/m}^3$$

Aplicando los principios del manómetro diferencial y expresando la altura de presión en metros de aire, se tiene

$$\frac{\Delta p}{w_1} = 0,160 \left( \frac{w_{\text{ac}}}{w_{\text{air}}} - 1 \right) = 0,160 \left( \frac{0,910 \times 1000}{3,45} - 1 \right) = 42,0 \text{ m de aire}$$

Suponiendo  $c = 0,980$  y empleando la ecuación (1) del Problema 22 después de multiplicar por tenemos

$$W = w_1 Q = 3,45 \times \frac{1}{4} \pi (5/100)^2 (0,980) \sqrt{\frac{2g(42,0)}{1 - (5/10)^4}} = 0,196 \text{ kg/seg}$$

Para comprobar el valor de  $c$  se calcula el número de Reynolds y se utiliza la curva apropiada del Diagrama D. [En este caso,  $w_1 = w_2$  y  $v = 1,57 \times 10^{-3}$  a la presión normal, dato tomado de la Tabla

$$\begin{aligned} V_2 &= \frac{W}{A_2 w_2} = \frac{W}{(\pi d_2^2/4) w_2} \\ \text{Entonces, } R_E &= \frac{V_2 d_2}{v} = \frac{4W}{\pi d_2^2 w_2} = \frac{4(0,196)}{\pi (5/100)(1,57 \times 10^{-3})} = 271,500 \end{aligned}$$

Del Diagrama D se deduce  $c = 0,986$ . Recalculando,  $W = 0,197 \text{ kg/seg}$ .

No es necesaria mayor precisión en el cálculo puesto que tanto el número de Reynolds como el de  $c$ , leído en el Diagrama D, prácticamente no varían.

(b) En primer lugar se calcula la presión y los pesos específicos.

$$p_1 = (2,00 + 1,03)10.000 = 30.300 \text{ kg/m}^2, \quad p_2 = (30.300 - 42,0 \times 3,45) = 30.152 \text{ kg/cm}^2$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{30.152}{30.300} = 0,995 \quad \text{y} \quad \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^k = 0,995 \quad (\text{véase Cap. 1}). \quad \text{Luego } w_2 = 3,44 \text{ kg/m}^3$$

La Tabla 8 da algunos valores del coeficiente de expansión  $Y$  definido en el Problema 23. En este caso se debe interpolar entre las relaciones de presiones 0,95 y 1,00 a fin de obtener  $Y$  para  $p_2/p_1 = 0,995$ . Para  $k = 1,40$  y  $d_2/d_1 = 0,50$ , obtenemos  $Y = 0,997$ .

Suponiendo  $c = 0,980$ , del examen del Diagrama  $D$  y observando que  $K = 1,032c$ , la ecuación (2) del Problema 23 da

$$W = w_1 K A_2 Y \sqrt{2g(\Delta p/w_1)}$$

$$= (3,45)(1,032 \times 0,980) \times \frac{1}{4}\pi(0,05)^2 \times 0,997 \sqrt{19,6(42,0)} = 0,195 \text{ kg/seg}$$

$$\text{Para comprobar } c, \quad R_E = \frac{4W}{\pi d_2 w w_2} = \frac{4(0,195)}{\pi(0,05)(1,57 \times 1,03/3,03)10^{-5}(3,44)} = 271.000$$

y  $c = 0,986$  (Diagrama  $D$ , curva  $\beta = 0,50$ ).

Recalculando,  $W = 0,196 \text{ kg/seg}$ . No es preciso afinar más. Se observa que apenas se introduce error en la parte (a) al suponer constante la densidad del aire.

## 25.

Se utiliza un venturímetro de  $20 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  para medir el caudal de dióxido de carbono a  $20^\circ \text{C}$ . La diferencia de lecturas en la columna de agua del manómetro diferencial es de  $179,5 \text{ cm}$  y el barómetro indica  $76,0 \text{ cm}$  de mercurio. Para una presión de entrada de  $1,26 \text{ kg/cm}^2$  absolutos, calcular el caudal en  $\text{kg/seg}$ .

### Solución:

La presión absoluta a la entrada es  $p_1 = 1,26 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$  y el peso específico  $w_1$  del dióxido de carbono es

$$w_1 = \frac{1,26 \times 10^4}{19,2(273 + 20)} = 2,24 \text{ kg/m}^2$$

La presión diferencial =  $(179,5/100)(1000 - 2,24) = 1790 \text{ kg/m}^2$  y, por consiguiente, la presión en la garganta =  $p_2 = 12.600 - 1790 = 10.810 \text{ kg/m}^2$  absolutos.

Para obtener el peso específico  $w_2$  utilizamos  $\frac{p_2}{p_1} = \frac{10.810}{12.600} = 0,860$  y  $\frac{w_2}{w_1} = (0,860)^{1/k}$  (véase Cap. 1). Así, pues,  $w_2 = 2,24(0,860)^{1/1,3} = 2,00 \text{ kg/m}^3$ .

$$W = w_1 K A_2 Y \sqrt{2g(\Delta p/w_1)} \quad \text{en kg/seg}$$

Usando  $k = 1,30$ ,  $d_2/d_1 = 0,50$  y  $p_2/p_1 = 0,860$ ,  $Y$  (Tabla 8) =  $0,910$  por interpolación. Suponiendo  $c = 0,985$ , del Diagrama  $E$ , y teniendo en cuenta que  $K = 1,032c$ , tenemos

$$W = (2,24)(1,032 \times 0,985) \times \frac{1}{4}\pi(10/100)^2 \times 0,910 \sqrt{2g(1790/2,24)} = 2,05 \text{ kg/seg}$$

Para comprobar el valor supuesto de  $c$ , se determina el número de Reynolds y se emplea la curva adecuada en el Diagrama  $E$ . Del Problema 24,

$$R_E = \frac{4W}{\pi d_2 w w_2} = \frac{4(2,05)}{\pi(10/100)(0,846 \times 1,033/1,260 \times 10^{-5})(2,00)} = 1,89 \times 10^6$$

Del Diagrama  $E$ ,  $c = 0,984$ . Recalculando,  $W = 2,046 \text{ kg/seg}$ .

## 26.

Establecer la relación que limita la velocidad de un fluido compresible en pasos convergentes (velocidad del sonido).

### Solución:

Despreciando la velocidad de aproximación en la ecuación de Bernoulli ( $D$ ) del Problema 20, Capítulo 6, para un fluido ideal obtenemos

$$\frac{V_2^2}{2g} = \frac{k}{k-1} \left( \frac{p_1}{w_1} \right) \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} \right] \quad (1)$$

Además, si se sustituye  $(p_2/w_2)^{1/k}$  por  $(p_1/w_1)^{1/k}$  antes de la integración que conduce a la ecuación (, altura de velocidad sería

$$\frac{V_2^2}{2g} = \frac{k}{k-1} \left( \frac{p_2}{w_2} \right) \left[ \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right]$$

Si el fluido alcanza la velocidad del sonido  $c_2$  en la Sección 2, entonces  $V_2 = c_2$  y  $V_2^2 = c_2^2 = k p_2 g / w_2$  se Capítulo 1). Sustituyendo en la ecuación (2),

$$\frac{k p_2 g}{2g w_2} = \frac{k}{k-1} \left( \frac{p_2}{w_2} \right) \left[ \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right]$$

$$\text{y simplificando} \quad \frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)}$$

Esta relación  $p_2/p_1$  se denomina *relación de la presión crítica* y depende del fluido que fluye. Para va de  $p_2/p_1$  iguales o menores que la relación de la presión crítica, un gas circulará a la velocidad del sonido presión en un chorro libre circulando a la velocidad del sonido será *igual o mayor* que la presión que lo r

27. Sale dióxido de carbono a través de un orificio de un depósito en el que la presión manométrica es de 7,733 kg/cm<sup>2</sup> y la temperatura 20° C. ¿Cuál es la velocidad en el chorro (presión barométrica normal)?

**Solución:**

De la Tabla 1(A),  $R = 19,2$  y  $k = 1,30$ .

$$w_1 = \frac{p_1}{RT_1} = \frac{(7,733 + 1,033)(10,000)}{19,2(273 + 20)} = 1,56 \text{ kg/m}^3$$

$$\left( \frac{p_2}{p_1} \right) \text{ crítica} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)} = \left( \frac{2}{2,30} \right)^{1,30/0,30} = 0,542$$

$$\text{Relación} \left( \frac{\text{atmósfera}}{\text{presión depósito}} \right) = \frac{1,033}{8,766} = 0,118$$

Puesto que esta última relación es menor que la relación de presión crítica, la presión de escape del gas es 0,542  $\times p_1$ . Por consiguiente,  $p_2 = 0,542 \times 8,733 = 4,74 \text{ kg/cm}^2$  absolutos.

$$V_2 = c_2 = \sqrt{1,3 \times 9,8 \times 19,2 \times T_2} = \sqrt{245 T_2}$$

donde  $T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{0,30/1,30} = (0,542)^{0,30/1,30} = 0,868$ ,  $T_2 = 254^\circ \text{ K}$ . Entonces,  $V_2 = \sqrt{245 \times 254} = 24,9 \text{ m/seg}$ .

28. Circula nitrógeno a través de un conducto en el que existen cambios de sección. En una sección particular la velocidad es de 360 m/seg, la presión 0,84 kg/cm<sup>2</sup> absolutos y la temperatura 32° C. Suponiendo que no hay pérdidas por rozamiento y que se dan condiciones adiabáticas (a) hallar la velocidad en una sección donde la presión es 1,26 kg/cm<sup>2</sup> y (b) determinar el número de Mach en esa sección.

**Solución:**

Para el nitrógeno,  $R = 30,25$  y  $k = 1,40$  [de la Tabla 1(A) del Apéndice].

- (a) La ecuación (D) del Problema 20, Capítulo 6, para condiciones adiabáticas puede escribirse de la forma

$$\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} = \frac{k}{k-1} \left( \frac{p_1}{w_1} \right) \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} \right]$$

en donde no se ha considerado la pérdida de carga y  $z_1 = z_2$ .

El peso específico del nitrógeno en la sección 1 es

$$w_1 = \frac{p_1}{RT_1} = \frac{0,84 \times 10^4}{30,25(273 + 32)} = 0,91 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{o usar } p_1/w_1 = RT_1)$$

$$\text{Entonces, } \frac{V_2^2}{2g} - \frac{(360)^2}{2g} = \frac{1,40}{0,40} \left( \frac{0,84 \times 10^4}{0,91} \right) \left[ 1 - \left( \frac{1,26}{0,84} \right)^{0,40/1,40} \right] \text{ de donde } V_2 = 227 \text{ m/seg.}$$

$$(b) \text{ Número de Mach} = \frac{V_2}{c_2} = \frac{227}{\sqrt{kgRT_2}}, \quad \text{donde } \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} \quad \text{o} \quad \frac{T_2}{305} = \left( \frac{1,26}{0,84} \right)^{2/7} = 1,123.$$

$$\text{Luego } T_2 = 342^\circ \text{ K y número de Mach} = \frac{227}{\sqrt{1,4 \times 9,8 \times 30,25 \times 342}} = 0,605.$$

29. Desarrollar la fórmula teórica que da el caudal para un vertedero rectangular.

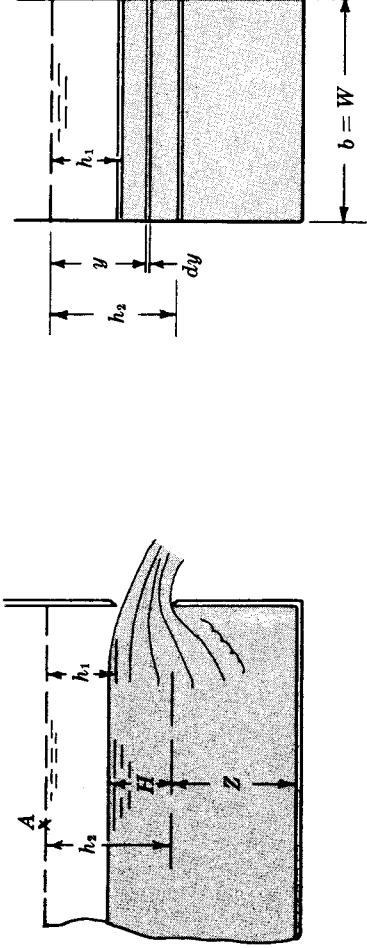


Fig. 9-7

#### Solución:

Consideremos la abertura rectangular de la Fig. 9-7, que se extiende a toda la anchura  $W$  del canal ( $b = W$ ). Con la superficie del líquido en la posición dibujada a trazos, la aplicación del teorema de Bernoulli entre  $A$  y una banda elemental de  $dy$  de altura en el chorro conduce, para condiciones ideales, a

$$(0 + V_A^2/2g + y) - \text{sin pérdidas} = (0 + V_{ch}^2/2g + 0)$$

donde  $V_A$  representa la velocidad media de las partículas que se aproximan a la abertura.

$$\text{Así, la } V_{ch} \text{ ideal} = \sqrt{2g(y + V_A^2/2g)}$$

$$\text{y} \quad (\text{ideal}) dQ = dA V_{ch} = (b dy) V_{ch} = b\sqrt{2g} (y + V_A^2/2g)^{1/2} dy$$

$$(\text{ideal}) Q = b\sqrt{2g} \int_{h_1}^{h_2} (y + V_A^2/2g)^{1/2} dy$$

Un vertedero existe cuando  $h_1 = 0$ . Sustituyendo  $h_2$  por  $H$  e introduciendo un coeficiente de descarga  $c$  para obtener el caudal real se tiene

$$\begin{aligned} Q &= cb\sqrt{2g} \int_0^H (y + V_A^2/2g)^{1/2} dy \\ &= \frac{8}{3} cb\sqrt{2g} [(H + V_A^2/2g)^{3/2} - (V_A^2/2g)^{3/2}] \\ &= mb[(H + V_A^2/2g)^{3/2} - (V_A^2/2g)^{3/2}] \end{aligned} \quad (1)$$

Notas:

(1) En un vertedero rectangular con contracciones laterales de la lámina, éstas originan una reducción del caudal. La longitud  $b$  se corrige para tener en cuenta esta condición y la fórmula se transforma en

$$Q = m(b - \frac{2}{10}H)[(H + V_A^2/2g)^{3/2} - (V_A^2/2g)^{3/2}] \quad (2)$$



- (2) En vertederos grandes y en la mayor parte de los vertederos con contracción lateral de la lámina, altura de velocidad es despreciable y entonces

$$\begin{aligned} Q &= m(b - \frac{2}{10}H)H^{3/2} && \text{para vertederos con contracción} \\ \text{o} \quad Q &= mbH^{3/2} && \text{para vertederos sin contracción} \end{aligned}$$

- (3) El coeficiente de descarga  $c$  no es constante. Comprende numerosos factores no incluidos en la derivación, tales como la tensión superficial, viscosidad, distribución no uniforme de la velocidad, flujos secundarios y otros.

30. Deducir la fórmula teórica del caudal a través de un vertedero triangular. Véase la figura adjunta.

**Solución:**

Del Problema 29 anterior,

$$V_{ch} = \sqrt{2g(y + \text{despreciable } V^2/2g)}$$

$$\text{y} \quad (\text{ideal}) \quad dQ = dAV_{ch} = x \, dy \sqrt{2gy}$$

Por semejanza de triángulos,

$$\frac{x}{b} = \frac{H-y}{H} \quad \text{y} \quad b = 2H \, \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}$$

$$\text{Luego (real)} \quad Q = (b/H)c\sqrt{2g} \int_0^H (H-y)^{1/2} dy.$$

Integrando y sustituyendo

$$Q = \frac{8}{15} c \sqrt{2g} H^{5/2} \operatorname{tg} \frac{1}{2} \theta$$

(1)

Un vertedero en V corriente es el que tiene una abertura de  $90^\circ$ . En este caso, la expresión (1) se transforma en  $Q = 2,36cH^{5/2}$ , en donde, para alturas de carga superiores a 0,3 m, un valor *medio* de  $c$  es 0,60 aproximadamente.

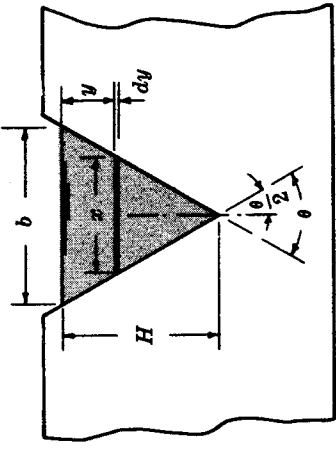


Fig. 9-8

31. Durante un ensayo sobre un vertedero sin contracciones de 2,4 m de ancho y 0,9 m de altura, la altura de carga se mantuvo constante e igual a 0,300 m. En 36 seg se recogieron 27.000 litros de agua. Hallar el factor  $m$  del vertedero en las ecuaciones (1) y (4) del Problema 29.

**Solución:**

$$(a) \quad \text{Caudal en m}^3/\text{seg.} \quad Q = 27.000/(1000 \times 36) = 0,75 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

$$(b) \quad \text{Velocidad de aproximación.} \quad V = Q/A = 0,75/(2,4 \times 1,2) = 0,260 \text{ m/seg. Luego}$$

$$V^2/2g = (0,26)^2/2g = 0,00345 \text{ m}$$

$$(c) \quad \text{Aplicando (1),} \quad Q = mb[(H + V^2/2g)^{3/2} - (V^2/2g)^{3/2}]$$

$$\text{o} \quad 0,75 = m \times 2,4[(0,300 + 0,00345)^{3/2} - (0,00345)^{3/2}]$$

$$\text{y} \quad m = 1,87.$$

$$\text{Aplicando (4),} \quad Q = 0,75 = mbH^{3/2} = m \times 2,4 \times (0,300)^{3/2}$$

$$\text{y} \quad m = 1,90 \text{ (aproximadamente 1,6\% mayor al desprestigiar el término de la velocidad de aproximación)}$$

32. Determinar el caudal a través de un vertedero sin contracciones de 3,0 m de largo y 1,2 m de alto bajo una altura de carga de 0,900 m. El valor de  $m$  es 1,90.

**Solución:**

Puesto que el término de la altura de velocidad no puede calcularse, un caudal aproximado es

$$Q = mbH^{3/2} = 1,90(3)(0,900)^{3/2} = 4,867 \text{ m}^3/\text{seg}$$

Para este caudal,  $V = 4,867/(3 \times 2,1) = 0,772 \text{ m/seg}$  y  $V^2/2g = 0,030 \text{ m}$ . Aplicando la ecuación (1) del Problema 29,

$$Q = 1,90(3)[(0,900 + 0,030)^{3/2} - (0,030)^{3/2}] = 5,082 \text{ m}^3/\text{seg}$$

Este segundo cálculo muestra un incremento de  $0,215 \text{ m}^3/\text{seg}$ , o sea, aproximadamente un  $4,4\%$  sobre el primer cálculo. Generalmente no están justificados cálculos más finos, es decir, más allá de la exactitud de la propia fórmula. Sin embargo, y a título ilustrativo, la velocidad de aproximación revisada sería

$$V = 5,082/(3 \times 2,1) = 0,807 \text{ m/seg} \quad \text{y} \quad V^2/2g = 0,033 \text{ m}$$

y  $Q = 1,90(3)[(0,900 + 0,033)^{3/2} - (0,033)^{3/2}] = 5,102 \text{ m}^3/\text{seg}$

33. Un vertedero sin contracciones de  $7,5 \text{ m}$  de largo desagua  $10 \text{ m}^3/\text{seg}$  a un canal. El factor del vertedero es  $m = 1,88$ . ¿Qué altura  $Z$  (precisión de  $1 \text{ cm}$ ) debe tener el vertedero si la profundidad del agua detrás del vertedero no excede de  $1,8 \text{ m}$ ?

**Solución:**

Velocidad de aproximación  $V = Q/A = 10/(7,5 \times 1,8) = 0,74 \text{ m/seg}$ .

$$\text{Entonces,} \quad 10 = 1,88 \times 7,5 \left[ \left( H + \frac{(0,74)^2}{2g} \right)^{3/2} - \left( \frac{(0,74)^2}{2g} \right)^{3/2} \right] \quad \text{y} \quad H = 0,77 \text{ m.}$$

Altura del vertedero  $Z = 1,80 - 0,77 = 1,03 \text{ m}$ .

34. Se va a instalar en un canal de  $2,4 \text{ m}$  de ancho un vertedero con contracciones de  $1,2 \text{ m}$  de altura. El caudal máximo a través del vertedero es de  $1,62 \text{ m}^3/\text{seg}$  cuando la profundidad total detrás del vertedero es  $2,1 \text{ m}$ . ¿Cuál será la anchura del vertedero a instalar si  $m = 1,87$ ?

**Solución:**

Velocidad de aproximación  $V = Q/A = 1,62/(2,4 \times 2,1) = 0,321 \text{ m/seg}$ . Como en este caso la altura de velocidad es despreciable, se tiene

$$Q = m(b - \frac{2}{10}H)(H)^{3/2}, \quad 1,62 = 1,87(b - \frac{2}{10} \times 0,90)(0,90)^{3/2}, \quad b = 1,20 \text{ m.}$$

35. El agua evacuada a través de un orificio de  $15 \text{ cm}$  de diámetro ( $c = 0,600$ ), bajo una altura de carga de  $3,0 \text{ m}$ , pasa a un canal rectangular y por un vertedero con contracciones. El canal tiene  $1,8 \text{ m}$  de ancho y, para el vertedero,  $Z = 1,50 \text{ m}$  y  $b = 0,30 \text{ m}$ . Determinar la profundidad de agua en el canal si  $m = 1,84$ .

**Solución:**

La descarga a través del orificio es

$$Q = cA\sqrt{2gh} = 0,600 \times \frac{1}{4}\pi(0,15)^2\sqrt{2g(3,0)} = 0,081 \text{ m}^3/\text{seg}$$

Para el vertedero,  $Q = m(b - \frac{2}{10}H)(H)^{3/2}$  (se desprecia la altura de velocidad)

$$\text{o} \quad 0,081 = 1,84(0,30 - 0,20H)H^{3/2} \quad \text{y} \quad 1,5H^{3/2} - H^{5/2} = 0,220$$

Por tanteos sucesivos,  $H = 0,33 \text{ m}$ ; y la profundidad  $= Z + H = 1,50 + 0,33 = 1,83 \text{ m}$ .

36. El caudal de agua a través de un vertedero triangular de  $45^\circ$  es de  $0,020 \text{ m}^3/\text{seg}$ . Determinar la altura de carga sobre el vertedero para  $c = 0,580$ .

**Solución:**

$$Q = \frac{8}{15}c\sqrt{2g} \left( \text{tg } \frac{1}{2}\theta \right) H^{5/2}, \quad 0,020 = \frac{8}{15}(0,580)\sqrt{2g} \left( \text{tg } 22,5^\circ \right) H^{5/2}, \quad H = 0,263 \text{ m}$$

37. ¿Cuál deberá ser la longitud de un vertedero trapezoidal (Cipolletti) de manera que la altura  $c$  sea 0,47 m para un caudal de  $3,45 \text{ m}^3/\text{seg}$ ?

**Solución:**

$$Q = 1,861bH^{3/2}, \quad 3,45 = 1,861b(0,47)^{3/2}, \quad b = 5,75 \text{ m}$$

38. Establecer la fórmula para determinar el tiempo de descenso del nivel de un líquido en un depósito de sección recta constante mediante un orificio. Véase la figura adjunta.

**Solución:**

Puesto que la altura de carga varía con el tiempo, sabemos que  $\partial V / \partial t \neq 0$ , es decir, el flujo no es estacionario. Esto significa que la ecuación de energía debe corregirse introduciendo un término de aceleración, que complica mucho la solución. En tanto que la altura de carga no varíe demasiado rápidamente, no se introducirá un apreciable error al suponer el flujo estacionario y, por consiguiente, despreciar el término de carga de aceleración. En el Problema 39 se da una comprobación aproximada sobre el error introducido.

#### CASO A.

Si *no existe* flujo de entrada, el caudal instantáneo será

$$Q = cA_o\sqrt{2gh} \quad \text{m}^3/\text{seg}$$

En un intervalo de tiempo  $dt$ , el pequeño volumen  $dV$  evacuado será  $Q dt$ . En el mismo intervalo de tiempo la altura de carga disminuirá  $dh$  m y el volumen evacuado será el área del depósito  $A_T$  por  $dh$ . Igualando estos valores,

$$(cA_o\sqrt{2gh}) dt = -A_T dh$$

donde el signo negativo indica que  $h$  disminuye al aumentar  $t$ . Despejando  $t$ , se obtiene

$$t = \int_{t_1}^{t_2} dt = \frac{-A_T}{cA_o\sqrt{2g}} \int_{h_1}^{h_2} h^{-1/2} dh$$

$$t = t_2 - t_1 = \frac{2A_T}{cA_o\sqrt{2g}} (h_1^{1/2} - h_2^{1/2}) \quad (1)$$

Al aplicar esta expresión puede emplearse un valor medio del coeficiente de descarga  $c$  sin que ello produzca un error significativo en el resultado. Como  $h_2$  es próximo de cero, se formará un vórtice y el orificio dejará de dar un flujo completo. Sin embargo, haciendo  $h_2 = 0$  no se originará en la mayoría de los casos un error importante.

La ecuación (1) puede escribirse también, al multiplicar y dividir por  $(h_1^{1/2} + h_2^{1/2})$ , de la forma

$$t = t_2 - t_1 = \frac{A_T(h_1 - h_2)}{\frac{1}{2}(cA_o\sqrt{2gh_1} + cA_o\sqrt{2gh_2})} \quad (2)$$

Teniendo en cuenta que el volumen evacuado en el tiempo  $(t_2 - t_1)$  es  $A_T(h_1 - h_2)$ , esta ecuación se simplifica a

$$t = t_2 - t_1 = \frac{\text{volumen evacuado}}{\frac{1}{2}(Q_1 + Q_2)} = \frac{\text{volumen evacuado en m}^3}{\text{caudal medio } Q \text{ en m}^3/\text{seg}} \quad (3)$$

El Problema 14 ilustrará un caso en que la sección recta del depósito no es constante aunque pueda expresarse como una función de  $h$ . Otros casos, tales como recipientes vaciándose, se salen del objeto de este libro (véanse los textos de Water Supply Engineering).

#### Caso B.

Con un flujo de entrada constante menor que el flujo a través del orificio,

$$-A_T dh = (Q_{sa} - Q_{en})dt \quad \text{y} \quad t = t_2 - t_1 = \int_{h_1}^{h_2} \frac{-A_T dh}{Q_{sa} - Q_{en}}$$

Si  $Q_e$  es superior a  $Q_s$ , la altura de carga aumentaría como es lógico.

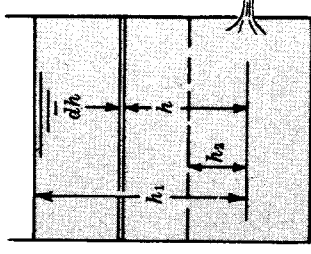


Fig. 9-9

39. Un depósito de 1,2 m de diámetro contiene aceite de 0,75 de densidad relativa. Cerca del fondo del depósito se instala un corto tubo de 7,5 cm de diámetro ( $c = 0,85$ ). ¿Cuánto tiempo tardará en bajar el nivel del aceite de 1,8 m a 1,2 m por encima del tubo?

**Solución:**

$$t = t_2 - t_1 = \frac{2A_T}{cA_o\sqrt{2g}} (h_1^{1/2} - h_2^{1/2}) = \frac{2 \times \frac{1}{4}\pi(1,2)^2}{0,85 \times \frac{1}{4}\pi(0,075)^2 \sqrt{2g}} (1,8^{1/2} - 1,2^{1/2}) = 33,3 \text{ seg}$$

A fin de evaluar el efecto aproximado al suponer el flujo estacionario, el cambio de velocidad con el tiempo  $t$  es

$$\frac{\partial V}{\partial t} \cong \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\sqrt{2g(1,8)} - \sqrt{2g(1,2)}}{33,3} = \frac{4,425(1,340 - 1,095)}{33,3} = 0,0325 \text{ m/seg}^2$$

Esto representa aproximadamente  $\frac{1}{3}\%$  de  $g$ , o sea, una despreciable adición a la aceleración  $g$ . Una tal precisión no está justificada en estos ejemplos de flujo estacionario, particularmente cuando los coeficientes de los orificios no se conocen con tanta exactitud.

40. La altura de carga inicial sobre un orificio era 2,7 m y cuando el flujo se detuvo la altura de carga medida era 1,2 m. ¿Bajo qué altura de carga  $H$  constante evacuaría el mismo orificio el mismo volumen de agua en el mismo intervalo de tiempo? Se supone constante el coeficiente  $c$ .

**Solución:**

Volumen bajo carga decreciente = volumen bajo carga constante

$$\frac{1}{2}cA_o\sqrt{2g}(h_1^{1/2} + h_2^{1/2}) \times t = cA_o\sqrt{2gH} \times t$$

Sustituyendo y operando,  $\frac{1}{2}(\sqrt{2,7} + \sqrt{1,2}) = \sqrt{H}$  y  $H = 1,88 \text{ m}$ .

41. Un depósito tiene la forma de un cono truncado con 2,4 m de diámetro en la base superior y 1,2 m de diámetro en la base inferior. El fondo contiene un orificio cuyo coeficiente medio de descarga es 0,60. ¿Cuál deberá ser el diámetro del orificio para vaciar el depósito en 6 minutos si la altura de carga inicial es de 3,0 m? Véase la figura adjunta.

**Solución:**

Del Problema 38,

$$Q dt = -A_T dh$$

$$cA_o\sqrt{2gh} dt = -\pi x^2 dh$$

y, por semejanza de triángulos,  $x/1,2 = (3 + h)/6$ . Entonces,

$$(0,60 \times \frac{1}{4}\pi d_o^2 \sqrt{2g}) dt = -\pi \frac{(3 + h)^2}{25} h^{-1/2} dh$$

$$d_o^2 \int dt = \frac{-4\pi}{25\pi \times 0,60\sqrt{2g}} \int_3^0 (3 + h)^2 h^{-1/2} dh$$

Puesto que  $\int dt = 360$  segundos,

$$d_o^2 = \frac{+4}{360 \times 25 \times 0,60\sqrt{2g}} \int_3^0 (9h^{-1/2} + 6h^{1/2} + h^{3/2}) dh$$

Integrando y operando, obtenemos  $d^2 = 0,00975$  y  $d = 0,0987 \text{ m}$ . Emplear  $d = 10 \text{ cm}$ .

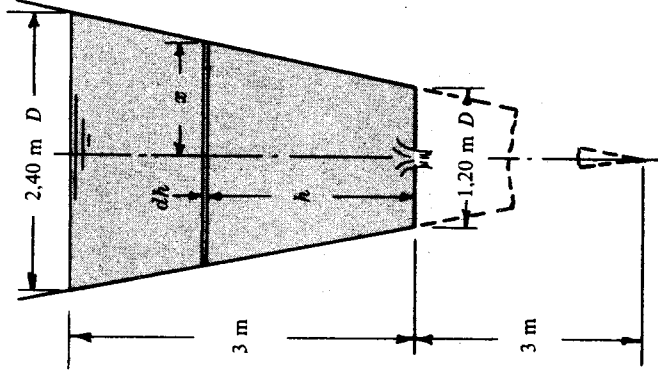


Fig. 9-10

- 42.** Dos depósitos cuadrados tienen una pared común en la que está dispuesto un orificio que tiene  $230 \text{ cm}^2$  de área y un coeficiente igual a 0,80. El depósito *A* tiene 2,4 m de lado y el nivel inicial de agua está a 3 m por encima del orificio. El tanque *B* tiene 1,2 m de lado y el nivel inicial de agua está a 0,9 m por encima del orificio. ¿Cuánto tiempo tardará el agua en alcanzar el mismo nivel en los dos depósitos?

**Solución:**

En un instante dado la diferencia de nivel de las superficies puede tomarse como altura de carga *h*. En tonces,

$$Q = 0,80 \times 0,023 \sqrt{2gh}$$

y la variación de volumen  $dv = Q \, dt = 0,0814 \sqrt{h} \, dt$ .

En este intervalo de tiempo  $dt$  la variación de la altura de carga es  $dh$ . Considérese que el nivel en el depósito *A* desciende  $dy$ ; entonces el correspondiente ascenso de nivel en el depósito *B* será la relación de las áreas por  $dy$ , o sea,  $(5,76/1,44)dy$ . La variación de la altura de carga es, pues,

$$dh = dy + (5,76/1,44)dy = 5dy$$

La variación de volumen es  $dv = 2,4 \times 2,4 \times dy \quad [= 1,2 \times 1,2 \times (5,76/1,44)dy]$

o, en función de  $dh$ ,

$$dv = (5,76/5)dh = 1,152dh$$

Igualando los valores de  $dv$ ,  $0,0814 \sqrt{h} \, dt = -1,1520dh$ ,  $dt = \frac{-1,1520}{0,0814} \int_{2,1}^0 h^{-1/2} dh$ ,  $t = 41,0 \text{ seg.}$

El problema puede resolverse también aplicando el caudal medio expresado en la ecuación (3) del Problema 38.

$$Q_m = \frac{1}{2}[0,80 \times 0,023 \sqrt{2g(2,1)}] = 0,059 \text{ m}^3/\text{seg}$$

El depósito *A* baja y metros mientras el *B* sube  $(5,76/1,44)y$  metros con la variación total de nivel de 2,1 m; entonces,  $y + 4y = 2,1$  e  $y = 0,42 \text{ m}$ . Así, pues, variación en volumen  $= 2,4 \times 2,4 \times 0,42 = 2,42 \text{ m}^3$  y

$$t = \frac{\text{variación en volumen}}{Q \text{ medio}} = \frac{2,42}{0,059} = 41,0 \text{ seg}$$

- 43.** Desarrollar la expresión que da el tiempo de descenso del nivel de un líquido en un depósito, tan que o canal mediante un vertedero sin contracciones.

**Solución:**

$$Q \, dt = -A_T \, dH \quad (\text{como antes}) \quad \text{o} \quad (mLH^{3/2}) \, dt = -A_T \, dH.$$

$$\text{Luego } t = \int_{t_1}^{t_2} dt = \frac{-A_T}{mL} \int_{H_1}^{H_2} H^{-3/2} dH \quad \text{o} \quad t = t_2 - t_1 = \frac{2A_T}{mL} (H_1^{-1/2} - H_2^{-1/2}).$$

- 44.** Un canal rectangular de 15 m de largo y 3 m de ancho alimenta un vertedero sin contracciones bajo una altura de carga de 0,300 m. Si la alimentación del canal se corta, ¿cuánto tiempo tardará en descender la altura de carga sobre el vertedero a 10 cm? Emplear  $m = 1,83$ .

**Solución:**

$$\text{Del Problema 43, } t = \frac{2(15 \times 3)}{1,83 \times 3} \left[ \frac{1}{\sqrt{0,100}} - \frac{1}{\sqrt{0,300}} \right] = 21,9 \text{ seg.}$$

- 45.** Determinar el tiempo necesario para establecer el flujo en una tubería de longitud *L* bajo una altura de carga *H* constante descargando en la atmósfera, suponiendo una tubería inelástica, un fluido incompresible y un factor de fricción *f* constante.

**Solución:**

La velocidad final  $V_f$  puede determinarse a partir de la ecuación de Bernoulli

$$H - f \frac{V_f^2}{d} \frac{V_f^2}{2g} - k \frac{V_f^2}{2g} = \left(0 + \frac{V_f^2}{2g} + 0\right)$$

En esta ecuación, las pérdidas menores se representan por el término  $k V_f^2/2g$ , y la energía en el chorro al final de la tubería es energía cinética representada por  $V_f^2/2g$ . Esta ecuación puede escribirse de la forma

$$\left[ H - f \frac{L_e}{d} \frac{V_f^2}{2g} \right] = 0 \quad (1)$$

donde  $L_e$  es la longitud equivalente de la tubería para el sistema (véase Problema 6, Capítulo 8).

De la ecuación del movimiento de Newton, en un instante dado

$$w(AH_c) = M \frac{dV}{dt} = \frac{w}{g} (AL) \frac{dV}{dt}$$

donde  $H_c$  es la altura de carga efectiva en ese instante y  $V$  es una función del tiempo y no de la longitud. Reagrupando la ecuación,

$$dt = \left( \frac{wAL}{g w A H_c} \right) dV \quad 0 \quad dt = \frac{L dV}{g H_c} \quad (2)$$

En la ecuación (1), para todos los valores intermedios de  $V$  el término entre corchetes no es cero, sino la altura de carga efectiva utilizable para causar la aceleración del líquido. Por consiguiente, la expresión (2) puede escribirse de la forma

$$\int dt = \int \frac{L dV}{g \left( H - f \frac{L_e}{d} \frac{V^2}{2g} \right)} = \int \frac{L dV}{g \left( f \frac{d}{L_e} \frac{V_f^2}{2g} - f \frac{L_e}{d} \frac{V^2}{2g} \right)} \quad (3A)$$

Puesto que de (1),  $\frac{f L_e}{2gd} = \frac{H}{V_f^2}$ ,  $\int dt = \int \frac{L dV}{g \left( H - H V^2/V_f^2 \right)}$  (3B)

$$0 \quad \int_0^t dt = \frac{L}{gH} \int_0^{V_f} \frac{V_f^2}{V_f^2 - V^2} dV$$

$$\text{Integrando,} \quad t = \frac{L V_f}{2gH} \ln \left( \frac{V_f + V}{V_f - V} \right) \quad (4)$$

Se observará que cuando  $V$  se aproxima a  $V_f$  ( $V_f - V$ ) tiende a cero y, por tanto, matemáticamente,  $t$  tiende a infinito.

Empleando el símbolo  $\phi$  para la relación  $V/V_f$ , la ecuación (3B) puede reagruparse de la forma

$$\frac{dV}{dt} = \frac{gH}{L} (1 - V^2/V_f^2) = \frac{gH}{L} (1 - \phi^2) \quad (5)$$

Haciendo  $V = V_f \phi$  y  $\frac{dV}{dt} = V_f (d\phi/dt)$ , obtenemos

$$\frac{d\phi}{1 - \phi^2} = \frac{gH}{V_f L} \frac{dt}{dt}$$

Integrando,

$$\frac{1}{2} \ln \left( \frac{1 + \phi}{1 - \phi} \right) = \frac{gH t}{V_f L} + C$$

y cuando  $t = 0$ ,  $C = 0$ . Luego

$$\frac{1 + \phi}{1 - \phi} = e^{2gHt/V_f L}$$

Utilizando las funciones hiperbólicas,  $\phi = \text{Th} (gHt/V_f L)$ , y puesto que  $\phi = V/V_f$ ,

$$V = V_f \text{Th} \frac{gHt}{V_f L} \quad (6)$$

La ventaja de la expresión (6) es que el valor de la velocidad  $V$  en función de la velocidad final  $V_f$  puede calcularse para cualquier tiempo.

46. Simplificar la ecuación (4) del problema anterior que da el tiempo necesario para establecer el flujo en los casos en los que la velocidad  $V$  sea igual a (a) 0.75, (b) 0.90, (c) 0.99 veces la velocidad final  $V_f$ .

**Solución:**

$$(a) \quad t = \frac{LV_f}{2gH} \ln \left[ \frac{V_f + 0.75V_f}{V_f - 0.75V_f} \right] = \left( \frac{LV_f}{2gH} \right) (2.3026) \lg \frac{1.75}{0.25} = 0.973 \frac{LV_f}{gH}$$

$$(b) \quad t = \frac{LV_f}{2gH} \ln \frac{1.90}{0.10} = \left( \frac{LV_f}{2gH} \right) (2.3026) \lg \frac{1.90}{0.10} = 1.472 \frac{LV_f}{gH}$$

$$(c) \quad t = \frac{LV_f}{2gH} \ln \frac{1.99}{0.01} = \left( \frac{LV_f}{2gH} \right) (2.3026) \lg \frac{1.99}{0.01} = 2.647 \frac{LV_f}{gH}$$

47. De un depósito sale agua a través de una tubería ( $f = 0.02$ ) de 600 m de longitud y 30 cm de diámetro. La altura de carga es constante e igual a 6 m. Las válvulas y conexiones en la línea producen unas pérdidas evaluadas en  $21(V^2/2g)$ . Después de abrir una válvula, ¿cuánto tiempo tardará en alcanzarse una velocidad equivalente al 90 % de la velocidad final?

**Solución:**

La aplicación de la ecuación de Bernoulli entre la superficie del depósito y el extremo de la tubería da

$$(0 + 0 + H) - [f(L/d) + 21.0]V^2/2g = (0 + V^2/2g + 0)$$

o sea,  $H = [0.02(600/0.3) + 22]V^2/2g = 62(V^2/2g)$ . Aplicando el procedimiento empleado en el Problema 6 del Capítulo 8,

$$62(V^2/2g) = 0.02(L_E/0.3)(V^2/2g) \quad \text{o} \quad L_E = 930 \text{ m}$$

Puesto que la ecuación (4) del Problema 45 no contiene el término  $L_E$ , la velocidad final debe calcularse como sigue:

$$H = f \frac{L_E}{d} \frac{V_f^2}{2g} \quad \text{o} \quad V_f = \sqrt{\frac{2gdH}{fL_E}} = \sqrt{\frac{19.6(0.3)(6)}{0.02(930)}} = 1.38 \text{ m/seg}$$

Sustituyendo en (b) en el Problema 46, se obtiene  $t = 1.472 \frac{(600)(1.38)}{(9.8)(6)} = 20.7$  segundos.

48. En el Problema 47, ¿qué velocidad alcanzará en 10 segundos y en 15 segundos?

**Solución:**

En la ecuación (6) del Problema 45, se calcula  $gHt/V_f L$ .

$$\text{Para 10 seg.} \quad \frac{9.8 \times 6 \times 10}{1.38 \times 600} = 0.710. \quad \text{Para 15 seg.} \quad \frac{9.8 \times 6 \times 15}{1.38 \times 600} = 1.065.$$

Empleando una tabla de funciones hiperbólicas y la ecuación (6),  $V = V_f \operatorname{Th} gHt/V_f L$ , obtenemos

$$\text{para 10 seg.} \quad V = 1.38 \operatorname{Th} 0.710 = 1.38 \times 0.611 = 0.843 \text{ m/seg}$$

$$\text{para 15 seg.} \quad V = 1.38 \operatorname{Th} 1.065 = 1.38 \times 0.788 = 1.087 \text{ m/seg}$$

Se observará que el valor de  $V/V_f$  está representado por el valor de la tangente hiperbólica. En la solución anterior, el 61 % y el 79 % de la velocidad final se alcanzan en 10 y 15 segundos, respectivamente.

## Problemas propuestos

- 49** A través de una tubería en la que está centrado un tubo de Pitot estático, que tiene un coeficiente de 0,97, circula trementina a  $20^{\circ}\text{C}$ . El manómetro diferencial de mercurio indica una diferencia de lecturas de 10 cm. ¿Cuál es la velocidad en el centro? *Sol.* 5,22 m/seg
- 50** Por un tubo de Pitot estático circula aire a  $49^{\circ}\text{C}$  a la velocidad de 18 m/seg. Si el coeficiente del tubo es 0,95, calcular la diferencia de lecturas en el manómetro diferencial de agua, suponiendo que el peso específico del aire a la presión atmosférica es constante. *Sol.* 2,0 cm
- 51** La pérdida de carga a través de un orificio de 5 cm de diámetro bajo una cierta altura de carga es 0,162 m y la velocidad del agua en el chorro es 6,75 m/seg. Si el coeficiente de descarga es 0,61, determinar la carga que produce el flujo, el diámetro del chorro y el coeficiente de velocidad. *Sol.* 2,49 m, 3,97 cm, 0,967
- 52** ¿Qué diámetro de orificio normal se requiere para evacuar  $0,0151\text{ m}^3/\text{seg}$  de agua bajo una altura de carga de 8,55 m? *Sol.* 5 cm
- 53** Un orificio aguzado tiene un diámetro de 2,5 cm y unos coeficientes de velocidad y contracción de 0,98 y 0,62, respectivamente. Si el chorro cae 0,924 m en una distancia horizontal de 2,457 m, determinar el caudal en  $\text{m}^3/\text{seg}$  y la altura de carga sobre el orificio. *Sol.* 0,0017  $\text{m}^3/\text{seg}$ , 1,666 m
- 54** A través de un orificio de 7,5 cm de diámetro circula, desde un depósito cerrado, aceite de densidad relativa 0,800 a razón de  $0,025\text{ m}^3/\text{seg}$ . El diámetro del chorro es 5,76 cm. El nivel del aceite es 7,35 m por encima del orificio y la presión de aire es equivalente a  $-15\text{ cm}$  de mercurio. Determinar los tres coeficientes del orificio. *Sol.* 0,584, 0,590, 0,990
- 55** Con referencia a la Fig. 9-11, el orificio de 7,5 cm de diámetro tiene coeficientes de velocidad y contracción de 0,950 y 0,632, respectivamente. Determinar (a) el caudal para la lectura manométrica de mercurio indicada y (b) la potencia del chorro. *Sol.* 0,0281  $\text{m}^3/\text{seg}$ , 1,94 CV

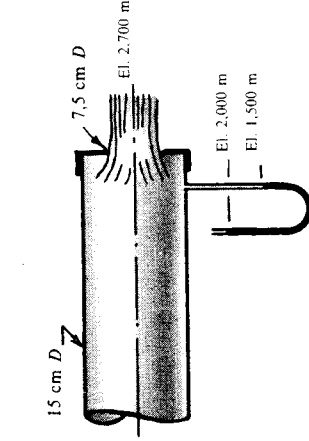


Fig. 9-11

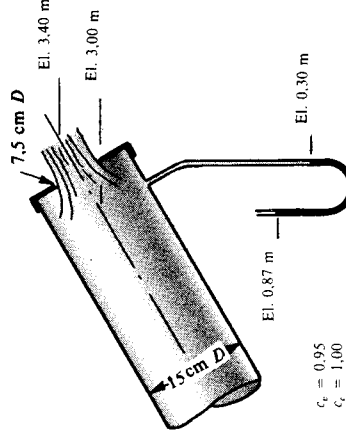


Fig. 9-12

- 56** Con referencia a la Fig. 9-12, fuel-oil pesado a  $15,5^{\circ}\text{C}$  circula a través de un orificio de 7,5 cm al final de la tubería, originando la diferencia de nivel de mercurio en el tubo manométrico. Determinar la potencia del chorro. *Sol.* 2,8 CV
- 57** En algunos casos, las locomotoras de vapor toman agua por medio de una cuchara que se sumerge en un largo y estrecho canal situado entre los raíles. Si la elevación sobre el canal es de 2,7 m, calcular la velocidad en km/h a que debe marchar el tren (despreciando el rozamiento). *Sol.* 26,2 km/h
- 58** Circula aire a  $15,5^{\circ}\text{C}$  a través de un amplio conducto y de ahí a través de un orificio de 7,5 cm de diámetro practicado en capa fina ( $c = 0,62$ ). Un tubo manométrico conteniendo agua da una lectura de 3,1 cm. Considerando que el peso específico del aire se mantiene constante, ¿cuál es el caudal, en kg/min, a través del orificio? *Sol.* 4,48 kg/min
- 59** Un aceite de 0,926 de densidad relativa y viscosidad de 350 Saybolt-segundos circula a través de un orificio de 7,5 cm de diámetro situado en una tubería de 12,5 cm de diámetro. El manómetro diferencial registra una caída de presión de  $1,5\text{ kg/cm}^2$ . Determinar el caudal  $Q$ . *Sol.* 0,05235  $\text{m}^3/\text{seg}$



60. Una boquilla de 5 cm de diámetro en la sección de salida, se conecta en la extremidad de una tubería horizontal de 20 cm de diámetro. Los coeficientes de velocidad y contracción son, respectivamente, 0,976 y 0,909. Un manómetro conectado en la base mayor de la boquilla y situado a 2,15 m sobre su línea central da una lectura de 2,25 kg/cm<sup>2</sup>. Determinar el caudal de agua en m<sup>3</sup>/seg. *Sol.* 0,0384 m<sup>3</sup>/seg
61. Cuando el caudal de agua que atraviesa un venturímetro horizontal ( $c = 0,95$ ) de 30 cm  $\times$  15 cm es de 0,111 m<sup>3</sup>/seg, hallar la diferencia de lecturas en el manómetro diferencial de mercurio conectado al medidor. *Sol.* 16,6 cm
62. Cuando el caudal de agua que pasa a través de un venturímetro de 30 cm  $\times$  15 cm es de 0,115 m<sup>3</sup>/seg, el manómetro diferencial indica una diferencia de lecturas de 2,20 m. ¿Cuál es el coeficiente de descarga del venturímetro? *Sol.* 0,960
63. La pérdida de carga a la entrada de la garganta de un venturímetro de 25 cm  $\times$  12,5 cm es 1/16 la altura de velocidad en la garganta. Cuando el manómetro diferencial de mercurio señala una diferencia de lecturas de 10 cm, ¿cuál es el caudal? *Sol.* 0,061 m<sup>3</sup>/seg
64. Por un venturímetro de 30 cm  $\times$  15 cm ( $c = 0,985$ ) pasan 0,0547 m<sup>3</sup>/seg de agua, siendo la diferencia de lecturas del manómetro diferencial 0,63 m. ¿Cuál es la densidad relativa del líquido del manómetro? *Sol.* 1,75
65. A través de un venturímetro de 30 cm  $\times$  15 cm circula metano a 15,5° C a razón de 7,5 kg/seg. La presión a la entrada del medidor es 3,5 kg/cm<sup>2</sup> absolutos. Empleando  $k = 1,31$ ,  $R = 52,8$ ,  $v = 1,8 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/seg a 1 atmósfera y  $W = 0,666$  kg/m<sup>3</sup> a 20° C y 1 atmósfera, calcular la diferencia de lecturas en el manómetro diferencial de mercurio. *Sol.* 0,354 m
66. Circula agua por una tubería de 15 cm en la que se ha instalado una boquilla de aforo del Problema 66 a 27° C a razón de 0,045 m<sup>3</sup>/seg. ¿Cuál será la diferencia de lecturas en el manómetro diferencial? (Emplear el Diagrama D.) *Sol.* 0,403 m
67. Por la boquilla de aforo del Problema 66 circula agua a 27° C a razón de 0,045 m<sup>3</sup>/seg. ¿Cuál será la diferencia de lecturas en el manómetro diferencial? (Emplear el Diagrama D.) *Sol.* 0,403 m
68. Si en el Problema 67 circula un aceite impermeable al polvo a 27° C a razón de 0,045 m<sup>3</sup>/seg, ¿cuál será la diferencia de lecturas en el manómetro diferencial de mercurio? *Sol.* 0,382 m
69. Si circula aire a 20° C por la misma tubería y boquilla del Problema 66, ¿cuántos kilogramos por segundo circularán si las presiones absolutas en la tubería y en el chorro son 2,10 kg/cm<sup>2</sup> y 1,75 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente? *Sol.* 1,662 kg/seg
70. ¿Qué profundidad de agua debe existir aguas arriba de un vertedero sin contracciones de cresta viva de 1,5 m de largo y 1,2 m de alto cuando pasa a través de un canal de 0,27 m<sup>3</sup>/seg? (Aplicar la fórmula de Francis.) *Sol.* 1,414 m
71. Un caudal de 0,85 m<sup>3</sup>/seg circula en un canal rectangular de 1,20 m de profundidad y 1,8 m de anchura. Hallar la altura a la que debería colocarse la cresta de un vertedero sin contracciones de cresta viva para que el agua no rebose los bordes del canal. ( $m = 1,84$ .) *Sol.* 0,80 m
72. Un caudal de 10,5 m<sup>3</sup>/seg pasa a través de un vertedero sin contracciones cuya longitud es 4,8 m. La profundidad total aguas arriba del vertedero no debe exceder de 2,4 m. Determinar la altura a que debería situarse la cresta del vertedero para transportar este caudal. ( $m = 1,84$ .) *Sol.* 1,326 m
73. Un vertedero sin contracciones ( $m = 1,84$ ) bajo una carga constante de 0,10 m alimenta un depósito que tiene un orificio de 7,5 cm de diámetro. El vertedero, de 0,60 m de largo y 0,80 m de alto, se instala en un canal rectangular. La pérdida de carga a través del orificio es 0,60 m y  $c_c = 0,65$ . Determinar la altura de carga a la cual asciende el agua en el depósito y el coeficiente de velocidad para el orificio. *Sol.*  $h = 8,28$  m,  $c_v = 0,96$
74. Un vertedero con contracciones de 1,2 m de largo está situado en un canal rectangular de 2,7 m de ancho. La altura de la cresta del vertedero es 1,10 m y la altura de carga 37,5 cm. Determinar el caudal, empleando  $m = 1,87$ . *Sol.* 0,483 m<sup>3</sup>/seg
75. Un vertedero triangular tiene un ángulo de 90°. ¿Qué altura de carga producirá 4800 l/min? *Sol.* 0,322 m
76. Una tubería de 90 cm de diámetro, que contiene un venturímetro de 90 cm  $\times$  30 cm, suministra agua a un canal rectangular. La presión a la entrada del venturímetro es 2,10 kg/cm<sup>2</sup> y en la garganta 0,60 kg/cm<sup>2</sup>. Un vertedero sin contracciones ( $m = 1,84$ ), de 0,90 m de alto, situado en el canal, descarga bajo una altura de carga de 22,5 cm. ¿Cuál es la anchura probable del canal? *Sol.* 6,20 m

77. Circula agua a través de un vertedero sin contracciones ( $m = 1,84$ ) de 3,6 m de largo y 0,6 m de alto. Para una carga de 0,360 m, hallar el caudal en  $\text{m}^3/\text{seg}$ . *Sol.* 1,477  $\text{m}^3/\text{seg}$
78. Un depósito de 3,6 m de largo y 1,2 m de ancho contiene 1,2 m de agua. ¿Cuánto tiempo tardará en bajar el agua a 0,3 m de profundidad si en el fondo del depósito se abre un orificio ( $c = 0,60$ ) de 7,5 cm de diámetro? *Sol.* 404 seg
79. Un depósito rectangular de 4,8 m por 1,2 m contiene 1,2 m de aceite de 0,75 de densidad relativa. Si tarda 10 minutos y 5 segundos en vaciarse el depósito a través de un orificio de 10 cm de diámetro situado en el fondo, determinar el valor medio del coeficiente de descarga. *Sol.* 0,60
80. En el Problema 79, para un coeficiente de descarga de 0,60, ¿a qué altura quedará el aceite en el depósito después de estar fluyendo por el orificio durante 5 minutos? *Sol.* 0,305 m
81. Un depósito de sección recta trapezoidal tiene una longitud constante e igual a 1,5 m. Cuando el agua está a una altura de 2,4 por encima de un orificio ( $c = 0,65$ ) de 5 cm de diámetro, la anchura de la superficie de agua es 1,8 m y, a 0,9 m de altura, la anchura de la superficie de agua es 1,2 m. ¿Cuánto tiempo tardará en bajar el nivel del agua de 2,4 m a 0,9 m? *Sol.* 470 seg
82. Al final de un depósito de sección cuadrada de 3 m de lado está situado un vertedero sin contracciones. Si la altura de carga sobre el vertedero es 0,6 m, ¿cuánto tiempo tardarán en salir 3,6  $\text{m}^3$  de agua del depósito? ( $m = 1,84$ .) *Sol.* 3,08 seg
83. Un canal rectangular de 18 m de largo por 3 m de ancho desagua su flujo a través de un vertedero sin contracciones de 3 m de largo bajo una altura de carga de 0,3 m. Si la alimentación se corta instantáneamente, ¿cuál será la altura de carga sobre el vertedero a los 36 segundos? ( $m = 1,84$ .) *Sol.* 0,074 m
84. Dos orificios situados en la pared de un depósito están distanciados 1,8 m verticalmente uno de otro. La profundidad total del agua en el depósito es 4,2 m y la altura de carga sobre el orificio superior es 1,2 m. Para los mismos valores de  $c$ , demostrar que los chorros chocan en el mismo punto del plano horizontal sobre el que reposa el depósito. *Sol.* 1,186 m,  $c = 0,655$
85. Un orificio de 15 cm de diámetro evacúa 0,34  $\text{m}^3/\text{seg}$  de agua bajo una altura de carga de 44 m. Este caudal pasa a un canal rectangular de 3,6 m de ancho alcanzando una altura de 0,9 m, y de ahí a un vertedero con contracciones. La altura de carga sobre el vertedero es 0,3 m. ¿Cuál es la longitud del vertedero y el coeficiente del orificio? *Sol.* 1,186 m,  $c = 0,655$
86. La altura de carga sobre un vertedero sin contracciones  $G$  de 3,6 m de largo es 0,33 m y la velocidad de aproximación puede despreciarse. Para el sistema indicado en la Fig. 9-13, ¿cuál es la altura de presión en  $B$ ? Dibujar las líneas de alturas piezométricas. *Sol.* 63,6 m

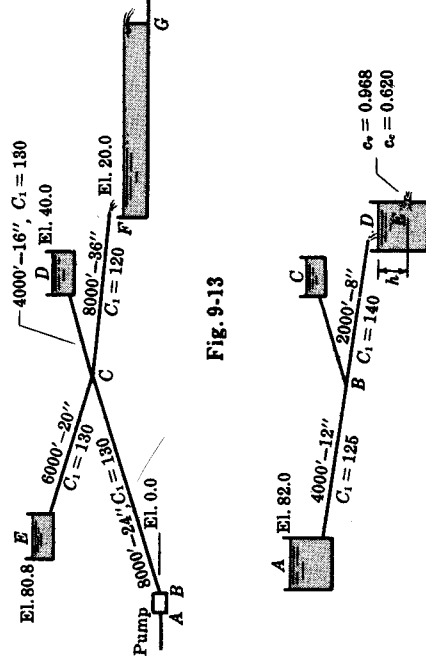
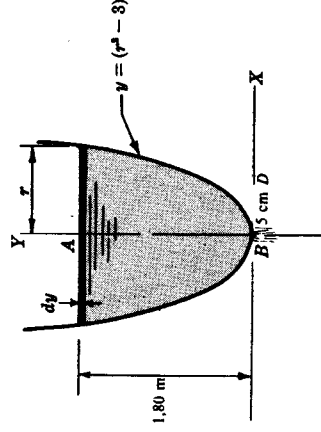


Fig. 9-14

87. En la Fig. 9-14 la elevación de la línea de alturas piezométricas en  $B$  es 15 m y las tuberías  $BC$  y  $BD$  están dispuestas de modo que el caudal se divida por igual a partir de  $B$ . ¿Cuál es la elevación de la extremidad de la tubería en  $D$  y cuál es la altura de carga que habrá sobre el orificio  $E$  de 10 cm de diámetro? *Sol.* El. 7,2 m,  $h = 6,33$  m

88. Para el depósito representado en la Fig. 9-15, empleando un coeficiente medio de descarga de 0,65 para el orificio de 5 cm de diámetro, ¿cuánto tiempo tardará en bajar el nivel del líquido 1,2 m? *Sol.* 660 seg

Fig. 9-15



# Capítulo 10

## Flujo en canales abiertos

### CANAL ABIERTO

Un canal abierto es un conducto en el que el líquido fluye con una superficie sometida a la presión atmosférica. El flujo se origina por la pendiente del canal y de la superficie del líquido. La solución exacta de los problemas de flujo es difícil y depende de datos experimentales que deben cumplir una amplia gama de condiciones.

### FLUJO UNIFORME Y PERMANENTE

El flujo uniforme y permanente comprende dos condiciones de flujo. El flujo permanente, como se define para flujo en tuberías, se refiere a la condición según la cual las características del flujo en un punto no varían con el tiempo ( $\partial V/\partial t = 0$ ,  $\partial y/\partial t = 0$ , etc.). El flujo uniforme se refiere a la condición según la cual la profundidad, pendiente, velocidad y sección recta permanecen constantes en una longitud dada del canal ( $\partial y/\partial L = 0$ ,  $\partial V/\partial L = 0$ , etc.).

La línea de alturas totales es paralela a la superficie del líquido (línea de alturas piezométricas) y  $V^2/2g$  por encima de ella. Esto no se cumple en el caso de flujo no uniforme y permanente.

### FLUJO NO UNIFORME

El flujo no uniforme ocurre cuando la profundidad del líquido varía a lo largo de la longitud del canal abierto, o sea,  $\partial y/\partial L \neq 0$ . El flujo no uniforme puede ser permanente o no permanente. También puede clasificarse en tranquilo, rápido o crítico.

### FLUJO LAMINAR

El flujo laminar en canales abiertos se dará para valores del número de Reynolds  $R_E$  de 2000 o menores. El flujo *puede* ser laminar por encima de  $R_E = 10,000$ . Para el flujo en canales abiertos,  $R_E = 4RV/\nu$ , donde  $R$  es el radio hidráulico.

**LA FORMULA DE CHEZY** para *flujo uniforme y permanente*, desarrollada en el Problema 1, es

$$V = C\sqrt{RS} \quad (1)$$

donde  $V$  = velocidad media en m/seg,  $C$  = coeficiente.

$R$  = radio hidráulico,  $S$  = pendiente de la superficie del agua o de la línea de energía o de la solera del canal; estas líneas son paralelas para el flujo uniforme y permanente.

**EL COEFICIENTE  $C$**  puede obtenerse aplicando cualquiera de las expresiones siguientes:

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} \quad (2)$$

(Véase Problema 1)

$$C = \frac{23 + \frac{0.00155}{S} + \frac{1}{n}}{1 + \frac{n}{\sqrt{R}} \left( 23 + \frac{0.00155}{S} \right)} \quad (3)$$

(Kutter)

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad \text{(Manning)*} \quad (4)$$

$$C = \frac{87}{1 + m/\sqrt{R}} \quad \text{(Bazin)} \quad (5)$$

$$C = -23.2 \lg \left( 1.811 \frac{C}{R_E} + \frac{\epsilon}{R} \right) \quad \text{(Powell)} \quad (6)$$

En las expresiones (3), (4) y (5),  $n$  y  $m$  son factores de rugosidad determinados experimentalmente solo para el agua. Algunos valores se dan en la Tabla 9 del Apéndice. En general, se prefiere el empleo de la fórmula de Manning. La fórmula de Powell se discutirá en los Problemas 9 y 10.

**EL CAUDAL ( $Q$ )** para flujo uniforme y permanente, aplicando la fórmula de Manning, es

$$Q = AV = A \left( \frac{1}{n} \right) R^{2/3} S^{1/2} \quad (7)$$

Las condiciones ligadas al flujo uniforme y permanente se llaman normales. De ahí los términos profundidad normal y pendiente normal.

**LA PERDIDA DE CARGA ( $h_L$ )**, expresada en términos de la fórmula de Manning, es

$$h_L = \left[ \frac{Vn}{R^{2/3}} \right]^2 L, \text{ haciendo } S = h_L/L \quad (8)$$

En el caso de flujo no uniforme pueden emplearse los valores medios de  $V$  y  $R$  con aceptable precisión. Para un canal largo se emplearán longitudes cortas en las que los cambios en profundidad sean de la misma magnitud.

### DISTRIBUCION VERTICAL DE LA VELOCIDAD

La distribución vertical de la velocidad en un canal abierto puede suponerse parabólica para flujo laminar y logarítmica para flujo turbulento.

Para un flujo *laminar* uniforme en canales abiertos amplios de profundidad media  $y_m$ , la distribución de velocidad puede expresarse así

$$v = \frac{gS}{\nu} \left( y y_m - \frac{1}{2} y^2 \right) \quad \text{o} \quad v = \frac{wS}{\mu} \left( y y_m - \frac{1}{2} y^2 \right) \quad (9)$$

La velocidad media  $V$ , deducida de esta ecuación en el Problema 3, es

$$V = \frac{gS y_m^2}{3\nu} \quad \text{o} \quad V = \frac{wS y_m^2}{3\mu} \quad (10)$$

Para un flujo *turbulento* uniforme en canales abiertos anchos la distribución de velocidad (desarrollada en el Problema 4) puede expresarse así

$$v = 2.5 \sqrt{\tau_0/\rho} \ln (y/y_0) \quad \text{o} \quad v = 5.75 \sqrt{\tau_0/\rho} \lg (y/y_0) \quad (11)$$

### ENERGIA ESPECIFICA

La energía específica ( $E$ ) se define como la energía por unidad de peso (m kg/kg) con relación a la solera del canal, o sea,

$$E = \text{profundidad} + \text{altura de velocidad} = y + V^2/2g \quad (12A)$$

Una expresión más exacta del término de energía cinética sería  $\alpha V^2/2g$ . Véase el Capítulo 6 para la discusión del factor de corrección de la energía cinética  $\alpha$ .

En función del caudal  $q$  por unidad de anchura  $b$  del canal (o sea,  $q = Q/b$ ),

$$E = y + (1/2g)(q/y)^2 \quad \text{o} \quad q = \sqrt{2g(y^2 E - y^3)} \quad (12B)$$

\* En la literatura técnica en castellano se conserva  $n$  en unidades inglesas (ft<sup>1/6</sup>), por lo que la constante 1,486, que aparece en la literatura técnica en inglés, se reduce a la unidad.  $N$ . del  $T$ .

Para un flujo uniforme, la energía específica permanece constante de una sección a otra. Para flujo no uniforme, la energía específica a lo largo del canal puede aumentar o disminuir.

### PROFUNDIDAD CRÍTICA

La profundidad crítica ( $y_c$ ) para un caudal unidad constante  $q$  en un canal rectangular es aquella para la cual la energía específica es mínima. Como se demuestra en los Problemas 27 y 28,

$$y_c = \sqrt[3]{q^2/g} = \sqrt[3]{E_c} = V_c^2/g$$

Esta expresión puede transformarse en

$$V_c = \sqrt{gy_c} \quad \text{o} \quad V_c/\sqrt{gy_c} = 1 \quad \text{para flujo crítico}$$

Por consiguiente, si el número de Froude  $N_F = V_c/\sqrt{gy_c} = 1$ , existe el flujo crítico. Si  $N_F$  hay flujo supercrítico (flujo rápido); y si  $N_F < 1$ , el flujo es subcrítico (flujo tranquilo).

### CAUDAL UNITARIO MÁXIMO

El caudal unitario máximo ( $q_{\max}$ ) en un canal rectangular, para una energía específica dada  $E$ , como se demuestra en el Problema 28,

$$q_{\max} = \sqrt{gy_c^3} = \sqrt{g(\sqrt[3]{E})^3}$$

**EN CANALES NO RECTANGULARES Y PARA UN FLUJO CRÍTICO**, como se ha desarrollado en el Problema 27,

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{A_c^3}{b'} \quad \text{o} \quad \frac{Q^2 b'}{g A_c^3} = 1$$

donde  $b'$  es la anchura de la superficie de agua. La expresión (16) la podemos transformar, dividiendo por  $A_c^2$ , en la forma

$$V_c^2/g = A_c/b' \quad \text{o} \quad V_c = \sqrt{gA_c/b'} = \sqrt{gy_m}$$

donde el término  $A_c/b'$  se denomina profundidad media  $y_m$ .

### FLUJO NO UNIFORME

Para estudiar el flujo no uniforme en canales abiertos, éstos suelen dividirse en longitudes  $L$  madas tramos. Para calcular las curvas de perfil, la ecuación de energía (véase Problema 39) conduce

$$L \text{ en m} = \frac{(V_1^2/2g + y_1) - (V_2^2/2g + y_2)}{S_0 - S} = \frac{E_2 - E_1}{S_0 - S} = \frac{E_1 - E_2}{S - S_0}$$

donde  $S_0$  = la pendiente de la solera del canal y  $S$  = la pendiente de la línea de energía.

Para sucesivos tramos, donde los cambios en profundidad son aproximadamente los mismos gradiente de energía  $S$  puede escribirse así

$$S = \left( -\frac{n V_{\text{medio}}}{R_{\text{medio}}^{2/3}} \right)^2 \quad \text{o} \quad \frac{V_{\text{medio}}^2}{C^2 R_{\text{medio}}}$$

Los perfiles superficiales para condiciones de flujo gradualmente variable en canales rectangulares anchos pueden analizarse empleando la expresión

$$\frac{dy}{dL} = \frac{S_0 - S}{(1 - V^2/gy)}$$

El término  $dy/dL$  representa la pendiente de la superficie del agua en relación con la solera del canal. Así, pues, si  $dy/dL$  es positivo, la profundidad aumenta aguas abajo. Los Problemas 44 y 45 desarrollarán la ecuación y un sistema de clasificación de los perfiles superficiales.

**LOS VERTEDEROS DE AFORO DE PARED GRUESA** pueden emplearse para medir el caudal en un canal.

El caudal unitario es  $q = \sqrt{g(\frac{2}{3}E)^{3/2}}$ , donde  $E$  es la energía específica referida a la cresta del vertedero o la altura de carga aguas arriba más la altura de velocidad de aproximación. Debido al rozamiento, el caudal real es del 90 al 92 % del valor dado por esta fórmula. La ecuación aproximada es  $q = 1,67H^{3/2}$  (véase Problema 52).

## RESALTO HIDRAULICO

El resalto hidráulico se produce cuando un flujo supercrítico cambia a flujo subcrítico. En tales casos, la elevación de la superficie líquida aumenta súbitamente en la dirección del flujo. En el caso de un flujo constante en un canal rectangular, como se ha deducido en el Problema 46,

$$\frac{q^2}{g} = y_1 y_2 \left( \frac{y_1 + y_2}{2} \right) \quad (21)$$

## Problemas resueltos

- 1 Desarrollar la ecuación general (Chezy) para el flujo uniforme y permanente en un canal abierto.

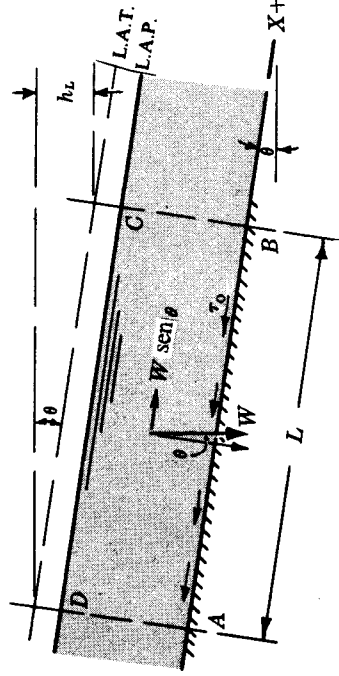


Fig. 10-1

### Solución:

En la Fig. 10-1, considérese el volumen de líquido  $ABCD$  de sección recta constante  $A$  y de longitud  $L$ . El volumen puede considerarse en equilibrio puesto que el flujo es permanente (aceleración nula). Sumando las fuerzas que actúan en la dirección  $X$ ,

$$\text{fuerza sobre superficie } AD - \text{fuerza sobre superficie } BC + W \text{ sen } \theta - \text{fuerzas resistentes} = 0$$

$$(h_L)$$

$$w\bar{h}A - w\bar{h}A + wAL \text{ sen } \theta - \tau_o pL = 0$$

donde  $\tau_o$  es la tensión cortante en la pared ( $\text{kg/m}^2$ ) que actúa sobre una superficie de  $L$  m de longitud y  $p$  m de ancho, siendo  $p$  el perímetro mojado. Entonces,

$$wAL \text{ sen } \theta = \tau_o pL \quad \text{y} \quad \tau_o = (wA \text{ sen } \theta)/p = wRS \quad (A)$$

ya que  $R = A/p$  y  $\text{sen } \theta = \text{tg } \theta = S$  para pequeños valores de  $\theta$ .

En el Problema 5 del Capítulo 7 se ha visto que  $\tau_o = (w/g)f(V^2/8)$ . Luego

$$wRS = (w/g)f(V^2/8) \quad \text{o} \quad V = \sqrt{(8g/f)RS} = C\sqrt{RS} \quad (B)$$

Para un flujo laminar,  $f$  puede tomarse igual a  $64/R_E$ . De donde

$$C = \sqrt{(8g/64)R_E} = 1,107\sqrt{R_E} \quad (C)$$

2. Demostrar que la distribución vertical de velocidad es parabólica en un canal abierto ancho ] un flujo laminar uniforme ( $y_m$  = profundidad media del canal).

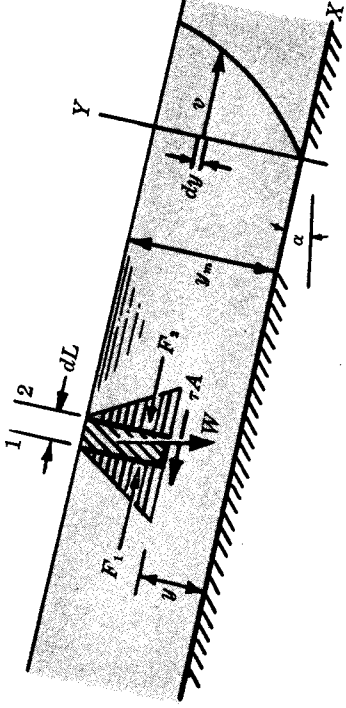


Fig. 10-2

**Solución:**

Cuando la velocidad y la profundidad son pequeñas, reflejando un número de Reynolds  $< 2000$ , la viscosidad se convierte en el factor de flujo dominante. El flujo resultante es laminar. (Para canales abiertos,  $R_F$  se define como  $4RV/v$ .) Para el volumen libre representado en la figura por la sección rayada, aplicando  $\Sigma F_x = 0$  obtenemos

$$F_1 - F_2 + w(y_m - y)dL \sin \alpha - \tau dL dz = 0$$

Puesto que  $F_1 = F_2$ , se tiene

$$\tau = w(y_m - y) \sin \alpha$$

Para un flujo laminar,  $\tau = \mu dv/dy$ , de donde obtenemos

$$dv = \frac{w}{\mu} (y_m - y) \sin \alpha dy = \frac{wS}{\mu} (y_m - y) dy \quad (1)$$

Para pequeños valores del ángulo  $\alpha$ , asociado a la pendiente de canales abiertos,  $\sin \alpha = \tan \alpha =$  pendiente  $S$ . Integrando (1), se obtiene

$$v = \frac{wS}{\mu} (yy_m - \frac{1}{2}y^2) + C \quad (2)$$

Como  $v = 0$  cuando  $y = 0$ , el valor de la constante  $C = 0$ . La ecuación (2) es una ecuación cuadrática que representa una parábola.

3. ¿Cuál es la velocidad media  $V$  en el Problema 2?

**Solución:**

$$(\text{Velocidad media})V = \frac{Q}{A} = \frac{\int v dA}{\int dA} = \frac{(wS/\mu) \int (yy_m - \frac{1}{2}y^2) dy dz}{\int dy dz = y_m dz}$$

donde  $dz$  es una constante (dimensión perpendicular al plano del papel).

$$V = \frac{wS dz}{\mu y_m dz} \int_0^{y_m} (yy_m - \frac{1}{2}y^2) dy = \frac{wSy_m^2}{3\mu}$$

4. Para un flujo uniforme y permanente en canales abiertos anchos, establecer una ecuación teórica que dé la velocidad media para superficies lisas.

**Solución:**

Para flujo turbulento, en general, la tensión cortante  $\tau$  puede expresarse de la forma

$$\tau = \rho l^2 (dv/dz)^2$$

donde  $l$  es la longitud de mezcla y una función de  $z$  (véase Capítulo 7).

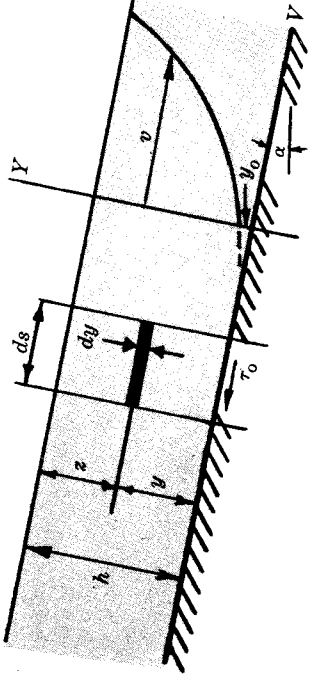


Fig. 10-3

Por otra parte, de la expresión (A) del Problema 1,  $\tau_o = wRS = whS$ , ya que el radio hidráulico  $R$  para canales anchos es igual a la profundidad.

En la capa límite, puesto que  $y$  es muy pequeño,  $z \cong h$  y  $\tau \cong \tau_o$ . Luego podemos igualar los valores de  $\tau_o$ ,

$$\rho l^2 (dv/dz)^2 = wzS \quad \text{o} \quad dv/dz = \pm \sqrt{gzS/l^2}$$

Para integrar esta expresión se ensaya un valor de  $l = k(h - z)(z/h)^{1/2}$ . Entonces,

$$-\frac{dv}{dz} = \sqrt{gS} \left[ \frac{z^{1/2}}{k(h - z)(z/h)^{1/2}} \right] = \frac{\sqrt{gSh}}{k} \left( \frac{1}{h - z} \right)$$

Se tiene  $y = (h - z)$  y  $dy = -dz$ ; luego

$$+ y \left( \frac{dv}{dy} \right) = \frac{\sqrt{gSh}}{k} \quad \text{y} \quad dv = \frac{\sqrt{gSh}}{k} \left( \frac{dy}{y} \right)$$

Como  $\tau_o/\rho = whS/\rho = gSh$ ,

$$dv = \frac{1}{k} \sqrt{\tau_o/\rho} \left( \frac{dy}{y} \right) \quad \text{o} \quad v = \frac{1}{k} \sqrt{\tau_o/\rho} \ln y + C$$

Para  $y = y_o$ ,  $v \cong 0$ ; luego  $C = (-1/k) \sqrt{\tau_o/\rho} \ln y_o$  y

$$v = \frac{1}{k} \sqrt{\tau_o/\rho} \ln (y/y_o) \quad (A)$$

*Nota:* Al desprejar la curva logarítmica a la izquierda de  $y_o$ , lo que introduce una aproximación, se consiguen resultados satisfactorios dentro de los límites de precisión esperados, ya que  $y_o$  es muy pequeño. Véase Problema 5 para el valor de  $y_o$ .

En esta expresión (A),  $k \cong 0,40$  y se llama constante de Von Karman. Puesto que el término  $\sqrt{\tau_o/\rho}$  tiene las dimensiones de m/seg, este término se denomina velocidad de corte y se designa por  $v_*$ . Así, pues,

$$v = 2,5v_* \ln (y/y_o) \quad (B)$$

De  $Q = AV = (h \times 1)V = \int v(dy \times 1)$ , obtenemos el valor de la velocidad media  $V$ . Así, pues,

$$V = \frac{\int v(dy \times 1)}{(h \times 1)} = \frac{2,5v_*}{h} \int_0^h (\ln y - \ln y_o) dy$$

Aplicando la regla de L'Hôpital, la velocidad media en el caso de superficies lisas donde existe una capa límite puede evaluarse en

$$V = 2,5v_* [\ln h - \ln y_o - 1] \quad (C)$$

En el Problema 5 se demostrará que  $y_o$  es igual a  $v/9_*$ . Por consiguiente, las ecuaciones (B) y (C) pueden escribirse de la forma

$$v = 2,5v_* \ln (9v_*/v) \quad (D)$$

$$V = 2,5v_* [\ln h - \ln(v/9v_*) - 1] \quad (E)$$

y



Frecuentemente la velocidad media en un canal abierto se toma como la velocidad observada en un punto situado a 0,6 de la profundidad (medida desde la superficie). Si aceptamos este valor de  $\bar{y}$ , entonces podemos escribir la velocidad media, a partir de la ecuación (B) anterior, de la forma

$$V = 2,5v_* \ln (0,4h/y_0)$$

Del Problema 5,  $y_0 = \delta/103$ . Entonces, para los canales anchos, puesto que el radio hidráulico  $R = h$ , la velocidad media es

$$V = 2,5v_* \ln 41,2R/\delta \quad (F)$$

5. Determinar el valor de  $y_0$  en el problema anterior.

**Solución:**

Para superficies lisas, en una capa límite (laminar),

$$\tau_o = \mu(dv/dy) = \nu\rho(dv/dy) \quad \text{o} \quad dv/dy = (\tau_o/\rho)/\nu = v_*^2/\nu \quad (\text{constante})$$

Designando por  $\delta$  el espesor de la capa límite,

$$\int dv = (v_*^2/\nu) \int_0^\delta dy \quad \text{o} \quad v_\delta = v_*^2\delta/\nu = R_{E_*}v_* \quad (A)$$

De datos experimentales,  $R_{E_*} \cong 11,6$  (prácticamente constante). Entonces,

$$v_*^2\delta/\nu = 11,6v_* \quad \text{o} \quad \delta = 11,6\nu/v_* \quad (B)$$

Haciendo  $y = \delta$  en la ecuación (B) del problema precedente,

$$v_\delta = 2,5v_* \ln \delta/y_0 \quad (C)$$

Combinando (C) con (A),  $\ln \delta/y_0 = v_\delta/2,5v_* = R_{E_*}/2,5 \cong 4,64$ ,

$$\delta/y_0 = e^{4,64} = 103 \quad y \quad \delta = 103\nu_* \quad (D)$$

Entonces, de (B),

$$y_0 = \frac{\delta}{103} \cong \frac{11,6\nu}{103v_*} \cong \frac{\nu}{9v_*} \quad (E)$$

6. Por un canal rectangular ancho y liso ( $n = 0,009$ ) circula agua a  $15^\circ\text{C}$  con una profundidad de 1,2 m y con una pendiente de 0,0004. Comparar el valor de  $C$  obtenido por la fórmula de Manning con el que da la aplicación de la expresión  $V = 2,5v_* \ln 41,2R/\delta$ .

**Solución:**

(a) Aplicando la fórmula de Manning,  $C = (1,0/n)R^{1/6} = (1,0/0,009)(1,2^{1/6}) = 114,5$ .

(b) Igualando la fórmula de Chezy para la velocidad media  $V$  con la expresión dada,

$$C = \sqrt{RS} = 2,5v_* \ln 41,2R/\delta$$

Sustituyendo  $v_* = \sqrt{gSR}$  del Problema 4, obtenemos

$$C = 2,5\sqrt{g \ln 41,2R/\delta} \quad (A)$$

Para el agua a  $15^\circ\text{C}$ ,  $\nu = 1,132 \times 10^{-6}$  y, tomando  $\delta = 11,6\nu/v_*$  de (B) del Problema 5, hallamos  $C = 97,5$ .

7. (a) Por un canal rectangular ancho circula agua con una profundidad de 1,2 m y una pendiente de 4 m sobre 10.000 m. Aplicando la fórmula teórica para la velocidad del Problema 4, calcular los valores de las velocidades teóricas a intervalos de profundidad de 1/10 de ésta, suponiendo que el canal es liso. (b) Comparar la media de los valores de velocidad a 0,2 y 0,8 con la velocidad a 0,6 de profundidad. (c) Calcular la posición de la velocidad media por debajo de la superficie del agua. Emplear como viscosidad cinemática el valor  $1,40 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}$ .

**Solución:**

$$\begin{aligned}
 (a) \text{ Puesto que } v_* &= \sqrt{\tau_0/\rho} = \sqrt{gRS} = \sqrt{ghS} \quad y \quad y_0 = v/9v_*, \\
 v &= 2,5v_* \ln y/y_0 = 2,5(2,303)\sqrt{ghS} \lg 9t_*v/v \\
 &= 5,75\sqrt{9,8(1,2)(0,0004)} \lg \frac{9y\sqrt{9,8(1,2)(0,0004)}}{1,4 \times 10^{-6}} \\
 &= 0,3945 \times \lg 4,41 \times 10^5 y
 \end{aligned} \tag{A}$$

A partir de (A) obtenemos los siguientes valores de velocidad  $v$ :

| Dist. hacia<br>abajo (%) | $y$ (m) | $441.000y$ | $\lg 441.000y$ | $v$ (m/seg) |
|--------------------------|---------|------------|----------------|-------------|
| 0                        | 1,20    | 529.200    | 5,7236         | 2,261       |
| 10                       | 1,08    | 476.280    | 5,6779         | 2,243       |
| 20                       | 0,96    | 423.360    | 5,6266         | 2,223       |
| 30                       | 0,84    | 370.440    | 5,5687         | 2,200       |
| 40                       | 0,72    | 317.520    | 5,5018         | 2,173       |
| 50                       | 0,60    | 264.600    | 5,4226         | 2,142       |
| 60                       | 0,48    | 211.680    | 5,3257         | 2,104       |
| 70                       | 0,36    | 158.760    | 5,2007         | 2,054       |
| 80                       | 0,24    | 105.840    | 5,0246         | 1,985       |
| 90                       | 0,12    | 52.920     | 4,7236         | 1,866       |
| 92,5                     | 0,09    | 39.690     | 4,5987         | 1,816       |
| 95,0                     | 0,06    | 26.460     | 4,4226         | 1,747       |
| 97,5                     | 0,03    | 13.230     | 4,1216         | 1,628       |
| 99,75                    | 0,003   | 1.323      | 3,1216         | 1,233       |

(b) La media de los valores a 0,2 y 0,8 de profundidad es  $V = \frac{1}{2}(2,223 + 1,985) = 2,104$  m/seg.

El valor a 0,6 de profundidad es 2,104. Normalmente no suele darse tal concordancia de valores.

8. Suponiendo correcta la fórmula de Manning para el cálculo de  $C$ , ¿qué valor de  $n$  satisfará el criterio de «liso» en el Problema 6?

**Solución:**

Igualando los valores de  $C$ , aplicando la expresión (A) del Problema 6, se tiene

$$\frac{R^{1/6}}{n} = 5,75\sqrt{g} \lg \left( \frac{41,2R}{\delta} \right) = 5,75\sqrt{g} \lg \left( \frac{41,2R\sqrt{gSR}}{11,6v} \right)$$

Sustituyendo valores y operando,  $n = 0,0106$ .

9. Aplicando la ecuación de Powell, ¿qué cantidad de líquido circulará en un canal rectangular liso de 0,6 m de ancho con una pendiente de 0,10 si la profundidad es 0,3 m? (Emplear  $v = 0,000039$  m<sup>2</sup>/seg).

**Solución:**

$$\text{La ecuación (6) es} \quad C = -23,20 \lg \left( 1,811 \frac{C}{R_E} + \frac{\epsilon}{R} \right)$$

Para canales lisos,  $\epsilon/R$  es pequeño y puede despreciarse; luego

$$C = 23,20 \lg 0,5521R_E/C \tag{A}$$

$R_E/C$  puede calcularse a partir de los datos conocidos mediante  $V = C\sqrt{RS}$ :

$$\begin{aligned}
 R_E &= 4RV/v = 4RC\sqrt{RS}/v \\
 0,5521R_E/C &= 4R^{3/2}S^{1/2}/v = 0,5521(4)(0,15)^{3/2}(0,01)^{1/2}/0,000039 = 329
 \end{aligned}$$

Entonces,  $C = 23,2 \lg 329 = 58,4$  y

$$Q = CA\sqrt{RS} = 58,4(0,18)\sqrt{0,15(0,01)} = 0,407 \text{ m}^3/\text{seg}$$

10. Determinar  $C$  mediante la fórmula de Powell para un canal rectangular de 0,6 m por 0,3 m si  $V = 1,65$  m/seg,  $\epsilon/R = 0,002$  y  $\nu = 0,000039$  m<sup>2</sup>/seg.

**Solución:**

Primero se calcula  $R_E = 4RV/\nu = 4(0,15)(1,65)/0,000039 = 25.385$ . Luego

$$C = -23,20 \lg \left( 1,811 - \frac{C}{25.385} + 0,002 \right)$$

Por aproximaciones sucesivas encontramos que  $C = 52$  es satisfactorio.

Powell ha representado gráficos de  $C$  en función de  $R_E$  para varios valores de la rugosidad relativa  $\epsilon/R$ . L gráficos simplifican los cálculos. Por otra parte indican una estrecha analogía con la fórmula de Colebrook para el flujo en tuberías.

11. (a) Encontrar una correlación entre el factor de rugosidad  $f$  y el factor de rugosidad  $n$ . (b) ¿Cuál es la tensión tangencial media en los flancos y solera de un canal rectangular de 3,6 m de ancho por 1,2 m de profundidad y trazado con una pendiente de 1,60 m/1000 m?

**Solución:**

(a) Tomando la fórmula de Manning como base de correlación,

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} = \frac{R^{1/6}}{n}, \quad \frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{R^{1/6}}{n\sqrt{8g}}, \quad f = \frac{8gn^2}{R^{1/3}}$$

(b) Del Problema 1,

$$\tau_o = wRS = w \left( \frac{\text{área}}{\text{perímetro mojado}} \right) (\text{pendiente}) = 1000 \left( \frac{3,6 \times 1,2}{1,2 + 3,6 + 1,2} \right) \left( \frac{1,60}{1000} \right) = 1,152 \text{ kg/m}^2$$

12. ¿Qué caudal puede alcanzarse en un canal revestido de cemento de 1,2 m de ancho trazado con un pendiente de 4 m sobre 10.000 m, si el agua circula con 0,6 m de profundidad? Aplicar los coeficientes  $C$  de Kutter y de Manning.

**Solución:**

(a) Aplicando el coeficiente  $C$  de Kutter. De la Tabla 9,  $n = 0,015$ . Radio hidráulico  $R = 1,2(0,6)/2,4 = 0,30$  r De la Tabla 10, para  $S = 0,0004$ ,  $R = 0,30$  y  $n = 0,015$ , el valor de  $C = 54$ .

$$Q = AV = AC\sqrt{RS} = (1,2 \times 0,6)(54)\sqrt{0,30 \times 0,0004} = 0,426 \text{ m}^3/\text{seg}$$

(b) Aplicando el coeficiente  $C$  de Manning,

$$Q = AV = A \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} = (1,2 \times 0,6) \frac{1}{0,015} (0,30)^{2/3} (0,0004)^{1/2} = 0,430 \text{ m}^3/\text{seg}$$

13. En un laboratorio hidráulico se ha medido un caudal de 0,393 m<sup>3</sup>/seg en un canal rectangular ( 1,2 m de ancho y 0,6 m de profundidad. Si la pendiente del canal era de 0,0004, ¿cuál es el factor de rugosidad para el revestimiento del canal?

**Solución:**

(a) Aplicando la fórmula de Kutter,

$$Q = 0,393 = AC\sqrt{RS} = (1,2 \times 0,6)C\sqrt{[(1,2 \times 0,6)/2,4](0,0004)} \quad \text{y} \quad C = 50$$

Interpolando en la Tabla 10,  $n = 0,016$ .

(b) Aplicando la fórmula de Manning,

$$Q = 0,393 = A \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} = (1,2 \times 0,6) \frac{1}{n} (0,3)^{2/3} (0,0004)^{1/2}, \quad n = 0,0164. \quad \text{Emplear } n = 0,016.$$

14. ¿Con qué pendiente se trazará una tubería de alcantarillado vitrificada de 60 cm de diámetro para que circulen  $0,162 \text{ m}^3/\text{seg}$  cuando la tubería está semillena? ¿Cuál será la pendiente si la tubería está completamente llena? (La Tabla 9 da  $n = 0,013$ .)

**Solución:**

$$\text{Radio hidráulico } R = \frac{\text{área}}{\text{perímetro mojado}} = \frac{\frac{1}{2}(\frac{1}{4}\pi d^2)}{\frac{1}{2}(\pi d)} = \frac{1}{4}d = 0,15 \text{ m.}$$

$$(a) \quad Q = 0,162 = A \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} = \frac{1}{2}(\frac{1}{4}\pi)(0,6)^2 \times \frac{1}{2}(\frac{1}{0,013})(0,15)^{2/3} S^{1/2}, \quad \sqrt{S} = 0,0528 \quad y \quad S = 0,00279.$$

$$(b) \quad R = \frac{1}{4}d = 0,15 \text{ m, como antes, } y \quad A = \frac{1}{4}\pi(0,6)^2. \text{ Luego } \sqrt{S} = 0,0264 \text{ y } S = 0,00070.$$

15. Por un canal trapezoidal de 6 m de anchura de solera y pendientes de las paredes de 1 sobre 1 circule la agua a 1,2 m de profundidad con una pendiente de 0,0009. Para un valor de  $n = 0,025$ , ¿cuál es el caudal?

**Solución:**

$$\text{Area } A = 6(1,2) + 2(\frac{1}{2})(1,2) = 8,64 \text{ m}, \quad R = 8,64/[6 + 2(1,2\sqrt{2})] = 0,92 \text{ m.}$$

$$Q = (1/n)AR^{2/3}S^{1/2} = (1/0,025)(8,64)(0,92)^{2/3}(0,03) = 9,8 \text{ m}^3/\text{seg}$$

16. Dos tuberías de hormigón ( $C = 55$ ) deben transportar el flujo desde un canal abierto de sección semicuadrada de 1,8 m de ancho y 0,9 m de profundidad ( $C = 66$ ). La pendiente de ambas estructuras es de 0,0009. (a) Determinar el diámetro de las tuberías. (b) Hallar la profundidad de agua en el canal rectangular, después de haberse estabilizado el flujo, si la pendiente cambia a 0,0016, empleando  $C = 66$ .

**Solución:**

$$(a) \quad \begin{aligned} Q_{\text{canal}} &= Q_{\text{tuberías}} \\ AC\sqrt{RS} &= 2AC\sqrt{RS} \\ (1,8 \times 0,9)(66)\sqrt{\frac{1,8 \times 0,9}{3,6}(0,0009)} &= 2(\frac{1}{4}\pi d^2)(55)\sqrt{\frac{d}{4}(0,0009)} \end{aligned}$$

$$2,15 = 1,30d^{5/2} \quad y \quad d = 1,225 \text{ m}$$

- (b) Para una profundidad  $y$ , el área  $A = 1,8y$  y el radio hidráulico  $R = \frac{1,8y}{1,8 + 2y}$ . Para el mismo caudal  $Q$

$$2,15 = (1,8y)(66)\sqrt{\frac{1,8y}{1,8 + 2y}(0,0016)}, \quad 1,8y\sqrt{\frac{1,8y}{1,8 + 2y}} = 0,814, \quad y^3 - 0,2275y = 0,2050$$

Por aproximaciones sucesivas:

$$\text{Para } y = 0,720 \text{ m, } (0,373 - 0,164) \neq 0,205 \text{ (disminuir } y).$$

$$\text{Para } y = 0,717 \text{ m, } (0,368 - 0,163) = 0,205 \text{ (satisfactorio).}$$

Así, pues, la profundidad, con precisión del orden del milímetro, es 0,717 m.

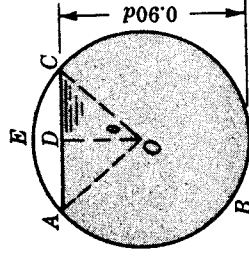
17. Una tubería de alcantarillado de revestimiento vitrificado ordinario se traza con una pendiente de 0,00020 y conduce  $2,30 \text{ m}^3/\text{seg}$  cuando la tubería está llena al 90 %. ¿Qué dimensión tendrá la tubería?

**Solución:**

De la Tabla 9,  $n = 0,015$ .

Se calcula el radio hidráulico  $R$  (véase la Fig. 10-4).

$$R = \frac{A}{P} = \frac{\text{área } AOCF - \text{sector } A OCD}{\text{arco } ABC}$$



$$\text{Angulo } \theta = \arccos(0,40d/0,50d) = \arccos 0,800, \quad \theta = 36^\circ 52'.$$

Fig. 10-4

Area del sector  $AOCE = [2(36^\circ 52')/360^\circ](\frac{1}{2}\pi d^2) = 0,1612d^2$ .  
 Longitud del arco  $ABC = \pi d - [2(36^\circ 52')/360^\circ](\pi d) = 2,498d$ .  
 Area del triángulo  $AOCD = 2(\frac{1}{2})(0,40d)(0,40d \operatorname{tg} 36^\circ 52') = 0,1200d^2$ .

$$R = \frac{\frac{1}{2}\pi d^2 - (0,1612d^2 - 0,1200d^2)}{2,498d} = \frac{0,7442d^2}{2,398d} = 0,298d$$

(a) Empleando el coeficiente  $C$  de Kutter (para un primer cálculo se supone igual a 55),

$$Q = CA\sqrt{RS}, \quad 2,30 = 55(0,7442d^2)\sqrt{0,298d(0,00020)}, \quad d^{5/2} = 7,278, \quad d = 2,212 \text{ m}$$

Para revisar  $C$ ,  $R = 0,298 \times 2,212 = 0,659$  m y la Tabla 10 da  $C = 62$ . Recalculando,

$$d^{5/2} = 7,278(55/62) = 6,456 \quad \text{o} \quad d = 2,109 \text{ m} \quad (\text{el } C \text{ revisado es satisfactorio}).$$

(b) Empleando el coeficiente  $C$  de Manning (y datos anteriores),

$$Q = \frac{1}{n}AR^{2/3}S^{1/2}$$

$$2,30 = \frac{1}{0,015}(0,7442d^2)(0,298d)^{2/3}(0,00020)^{1/2}, \quad d^{8/3} = 7,347, \quad d = 2,112 \text{ m}$$

- 18.** Por un canal rectangular de 6 m de ancho, trazado con una pendiente de 0,00010, circula agua a razón de 6,00 m<sup>3</sup>/seg. Determinar la profundidad del agua. Emplear  $n = 0,015$ .

**Solución:**

Aplicando la fórmula de Manning,

$$Q = \frac{1}{n}AR^{2/3}S^{1/2}, \quad 6,00 = \frac{1}{0,015}(6y)\frac{6y}{6+2y})^{2/3}(0,01), \quad 1,5 = y(\frac{6y}{6+2y})^{2/3}$$

Calculando por aproximaciones sucesivas, encontramos que el valor de  $y = 1,50$  m satisface la ecuación. El agua circulará a una profundidad de 1,50 m, llamada profundidad normal.

- 19.** ¿Con qué anchura se construirá un canal rectangular para transportar 13,5 m<sup>3</sup>/seg de agua a una profundidad de 1,8 m bajo una pendiente de 0,00040? Emplear  $n = 0,010$ .

**Solución:**

Aplicando la fórmula de Manning, con  $A = 1,8b$  y  $R = 1,8/(b + 3,6)$ , y calculando por aproximaciones sucesivas, hallamos la anchura requerida  $b = 3,91$  m.

- 20.** Deducir, a partir de la ecuación de Manning, los factores de descarga  $K$  y  $K'$  indicados en las Tablas 11 y 12 del Apéndice.

**Solución:**

Los factores de descarga aplicados a la fórmula de Manning pueden calcularse como sigue. El área de una sección recta cualquiera puede expresarse de la forma  $A = F_1y^2$ , donde  $F_1$  es un factor adimensional e  $y^2$  es el cuadrado de la profundidad. De manera análoga, el radio hidráulico  $R$  puede expresarse así  $R = F_2y$ . Entonces la fórmula de Manning se transforma en

$$Q = \frac{1}{n}(F_1y^2)(F_2y)^{2/3}S^{1/2} \quad \text{o} \quad \frac{Qn}{y^{8/3}S^{1/2}} = F_1F_2^{2/3} = K \quad (1)$$

Análogamente, en función de la anchura  $b$ ,  $A = F_3b^2$  y  $R = F_4b$ . Luego

$$\frac{Qn}{b^{8/3}S^{1/2}} = F_3F_4^{2/3} = K' \quad (2)$$

Las Tablas 11 y 12 dan los valores de  $K$  y  $K'$  para canales trapezoidales. Los valores de  $K$  y  $K'$  pueden calcularse para cualquier forma de sección recta.

21. ¿Cuáles son los factores de descarga  $K$  y  $K'$  para un canal rectangular de 6 m de ancho y 1,2 m de profundidad? Comparar con los valores dados por las Tablas 11 y 12.

**Solución:**

$$(a) \quad A = F_1 y^2, \quad 7,2 = F_1(1,2), \quad F_2 = 5,0. \quad R = F_2 y^3, \quad 7,2/8,4 = F_2(1,2), \quad F_2 = 0,714. \quad K = F_1 F_2^{2/3} = 4,00.$$

La Tabla 11 indica que para  $y/b = 1,2/6 = 0,20$ ,  $K = 4,00$ . (Comprobado.)

$$(b) \quad A = F_3 b^2, \quad 7,2 = F_3(36), \quad F_3 = 0,20. \quad R = F_4 b, \quad 7,2/8,4 = F_4(6), \quad F_4 = 0,143. \quad K' = F_3 F_4^{2/3} = 0,0546.$$

La Tabla 12 indica que para  $y/b = 1,2/6 = 0,20$ ,  $K' = 0,0546$ . (Comprobado.)

22. Resolver el Problema 18, empleando los factores de descarga de la Tabla 12.

**Solución:**

Del Problema 20, ecuación (2),

$$\frac{Qn}{b^{8/3} S^{1/2}} = K', \quad \frac{6(0,015)}{(6)^{8/3} (0,0001)^{1/2}} = 0,0757 = K'$$

La Tabla 12 indica que para canales trapezoidales de taludes verticales, un  $K'$  de 0,0757 representa una relación profundidad-anchura ( $y/b$ ) entre 0,24 y 0,26. Interpolando,  $y/b = 0,250$ . Luego  $y = 0,250(6) = 1,50$  m, al igual que se halló en el Problema 18.

23. Resolver el Problema 19 empleando los factores de descarga de la Tabla 11.

**Solución:**

Del Problema 20, ecuación (1),

$$\frac{Qn}{y^{8/3} S^{1/2}} = K, \quad \frac{13,5(0,010)}{(1,8)^{8/3} (0,0004)^{1/2}} = 1,41 = K$$

$K = 1,41$  corresponde exactamente a una relación  $y/b$  igual a 0,46. Luego  $b = 1,8/0,46 = 3,91$ , como se calculó en el Problema 19.

24. Un canal de sección recta trapezoidal transporta  $24,3 \text{ m}^3/\text{seg}$ . Si la pendiente  $S = 0,000144$ ,  $n = 0,015$ , anchura de la base  $b = 6$  m y las pendientes de las paredes son de 1 vertical sobre 1,5 horizontal, determinar la profundidad normal de flujo  $y_N$  por la fórmula y usando las Tablas.

**Solución:**

(a) Por la fórmula,

$$24,3 = \frac{1}{0,015} (6y_N + 1,5y_N^2) \left( \frac{6y_N + 1,5y_N^2}{6 + 2y_N \sqrt{3,25}} \right)^{2/3} (0,000144)^{1/2}$$

$$0 \quad 30,4 = \frac{(6y_N + 1,5y_N^2)^{5/3}}{(6 + 2y_N \sqrt{3,25})^{2/3}}$$

$$\text{Ensayando } y_N = 2,4: \quad 30,4 = \frac{(14,4 + 8,64)^{5/3}}{(6 + 4,8\sqrt{3,25})^{2/3}} \quad \text{o} \quad 30,4 \neq 31,2 \text{ (bastante ajustado).}$$

La profundidad de flujo puede calcularse por aproximaciones sucesivas hasta la precisión que se requiere. La profundidad normal es ligeramente menor que 2,4 m.

- (b) Cálculo previo para utilizar la Tabla 12 del Apéndice:

$$\frac{Qn}{b^{8/3} S^{1/2}} = \frac{24,3(0,015)}{(6)^{8/3} (0,000144)^{1/2}} = 0,256 = K'$$

En la Tabla 12, para una pendiente de las paredes del canal de 1 vertical sobre 1,5 horizontal,

$$y/b = 0,38, \quad K' = 0,238 \quad y \quad y/b = 0,40, \quad K' = 0,262$$

Interpolando para  $K' = 0,256$ , tenemos  $y/b = 0,395$ . Entonces,  $y_N = 0,395(6) = 2,370$  m.

25. Para un área de una sección recta dada determinar las dimensiones óptimas de un canal trapezoidal.

**Solución:**

El examen de la ecuación de Chezy indica que para un área de una sección recta y una pendiente dadas el caudal a través de un canal con una rugosidad dada será máximo cuando el radio hidráulico sea máximo. El radio hidráulico será máximo cuando el perímetro mojado sea mínimo. Refiriéndose a la Fig. 10-5,

$$A = by + 2\left(\frac{1}{2}y\right)(y \operatorname{tg} \theta)$$

$$\text{o} \quad b = A/y - y \operatorname{tg} \theta$$

$$p = b + 2y \sec \theta \quad \text{o} \quad p = A/y - y \operatorname{tg} \theta + 2y \sec \theta$$

Derivando  $p$  con respecto a  $y$  e igualando a cero,

$$dp/dy = -A/y^2 - \operatorname{tg} \theta + 2 \sec \theta = 0 \quad \text{o} \quad A = (2 \sec \theta - \operatorname{tg} \theta)y^2$$

$$(\text{Máximo}) \quad R = \frac{A}{p} = \frac{(2 \sec \theta - \operatorname{tg} \theta)y^2}{(2 \sec \theta - \operatorname{tg} \theta)y^2/y - y \operatorname{tg} \theta + 2y \sec \theta} = \frac{y}{2}$$

**Notas:**

- (1) Para todos los canales trapezoidales, la sección hidráulica óptima se obtiene cuando  $R = y/2$ . La sección simétrica será un semihexágono.
- (2) Para un canal rectangular (cuando  $\theta = 0^\circ$ ),  $A = 2y^2$  y también  $A = by$ , dando  $y = b/2$ , además la condición  $R = y/2$ . Así, pues, la profundidad óptima es la mitad de la anchura con el radio hidráulico igual a la mitad de la profundidad.
- (3) El círculo tiene el menor perímetro para un área dada. Un canal abierto semicircular desaguará el agua que cualquier otro de distinta forma (para la misma área, pendiente y factor  $n$ ).

26. (a) Determinar la sección óptima de un canal trapezoidal,  $n = 0,025$ , para transportar  $12,6 \text{ m}^3/\text{s}$ . Para evitar la erosión, la velocidad máxima ha de ser  $0,90 \text{ m/seg}$  y las pendientes de las paredes del canal trapezoidal son 1 vertical sobre 2 horizontal. (b) ¿Cuál deberá ser la pendiente  $S$  del canal? Referirse a la figura del Problema 25.

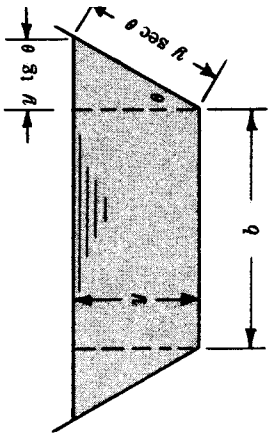
**Solución:**

$$(a) \quad R = \frac{y}{2} = \frac{A}{p} = \frac{by + 2(\frac{1}{2}y)(2y)}{b + 2y\sqrt{5}} \quad \text{o} \quad b = 2y\sqrt{5} - 4y$$

$$A = Q/V = 12,60/0,90 = by + 2y^2 \quad \text{o} \quad b = (14 - 2y^2)/y$$

Igualando (1) y (2), obtenemos  $y = 2,38$  m. Sustituyendo en (2),  $b = 1,2$  m.  
Para este canal trapezoidal,  $b = 1,12$  m e  $y = 2,38$  m.

$$(b) \quad V = (1/n)R^{2/3}S^{1/2}, \quad 0,90 = (1/0,025)(2,38/2)^{2/3}S^{1/2}, \quad S = 0,000405$$



**Fig. 10-5**

27. Desarrollar la expresión para la profundidad crítica, energía específica crítica y velocidad crítica (a) en canales rectangulares y (b) en cualquier canal.

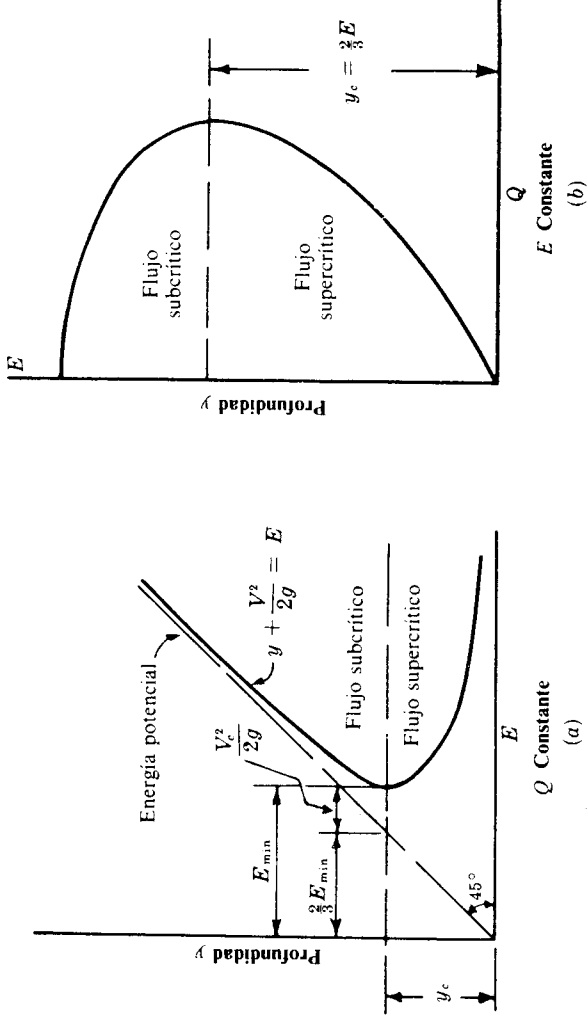


Fig. 10-6

**Solución:****(a) Canales rectangulares.**

Por definición, 
$$E = y + \frac{V^2}{2g} = y + \frac{1}{2g} \left( \frac{Q}{by} \right)^2 = y + \frac{1}{2g} \left( \frac{q}{y} \right)^2 \quad (1)$$

La profundidad crítica para un caudal dado  $Q$  ocurre cuando  $E$  es mínimo. Siguiendo el procedimiento normal de cálculo,

$$\frac{dE}{dy} = \frac{d}{dy} \left[ y + \frac{1}{2g} \left( \frac{q}{y} \right)^2 \right] = 1 - \frac{q^2}{gy^3} = 0, \quad q^2 = gy_c^3, \quad y_c = \sqrt[3]{q^2/g} \quad (2)$$

Eliminando  $q$  entre (1) y (2),

$$E_c = y_c + \frac{gy_c^3}{2gy_c^2} = \frac{3}{2}y_c \quad (3)$$

Puesto que  $q = yV$  ( $b = \text{unidad}$ ), la expresión (2) da

$$y_c^3 = \frac{q^2}{g} = \frac{y_c^2 V_c^2}{g}, \quad V_c = \sqrt{gy_c}, \quad \frac{V_c^2}{2g} = \frac{y_c}{2} \quad (4)$$

**(b) Cualquier canal.**

$$E = y + \frac{V^2}{2g} = y + \frac{1}{2g} \left( \frac{Q}{A} \right)^2$$

Para un  $Q$  constante, y puesto que el área  $A$  varía con la profundidad  $y$ ,

$$\frac{dE}{dy} = 1 + \frac{Q^2}{2g} \left( -\frac{2}{A^3} \cdot \frac{dA}{dy} \right) = 1 - \frac{Q^2}{A^3} \frac{dA}{dy} = 0$$

El área  $dA$  se define como la anchura de la superficie de agua  $b' \times dy$ . Sustituyendo en la ecuación anterior, se obtiene

$$\frac{Q^2 b'}{g A_c^3} = 1 \quad \text{o} \quad \frac{Q^2}{g} = \frac{A_c^3}{b'} \quad (5)$$

Esta ecuación debe satisfacerse para las condiciones críticas del flujo. El segundo miembro es una función de la profundidad  $y$ , y generalmente se precisa una solución por aproximaciones sucesivas para determinar el valor de  $y_c$  para el que se satisface la ecuación (5).



Dividiendo  $Q^2$  por  $A_c^2$ , o en función de la velocidad media, ( $\bar{v}$ ) puede escribirse de la forma

$$V_c^2/g = A_c/b' \quad \text{o} \quad V_c = \sqrt{gA_c/b'}$$

Introduciendo la profundidad media  $y_m$ , igual al área  $A$  dividida por la dimensión  $b'$ , la ecuación puede escribirse de la forma

$$Q = A\sqrt{gA/b'} = A\sqrt{gy_m}$$

$$\text{Por otra parte,} \quad V_c = \sqrt{gA_c/b'} = \sqrt{gy_m} \quad \text{o} \quad V_c^2/gy_m = 1$$

La energía específica mínima es, aplicando (8'),

$$E_{\min} = y_c + V_c^2/2g = y_c + \frac{1}{2}y_m$$

Para un canal rectangular  $A_c = b'y_c$ , y (6) se reduce a la ecuación (4) anterior.

La Fig. 10-6 representa la ecuación (1) para  $Q$  constante y para  $E$  constante. Cuando el flujo es máximo de ser crítico, la superficie se hace inestable produciendo olas. No es deseable diseñar canales pendientes próximas a la crítica.

28. Deducir la expresión que da el caudal máximo por unidad de anchura  $q$  en un canal rectangular para una energía específica  $E$  dada.

**Solución:**

Despejando  $q$  en la ecuación (1) del Problema 27, se tiene  $q = \sqrt{2g(E - y)^{3/2}}$ . Derivando con respecto a  $y$  e igualando a cero, obtenemos  $y_c = \frac{2}{3}E$ . La ecuación (2) del Problema 27 se transforma ahora en

$$q_{\max}^2 = g(\frac{2}{3}E_c)^3 = gy_c^3 \quad \text{o} \quad q_{\max} = \sqrt{gy_c^3}$$

Resumiendo, para canales rectangulares, las características de flujo crítico son:

- (a)  $E_{\min} = \frac{3}{2}\sqrt{q^2/g}$
- (b)  $q_{\max} = \sqrt{gy_c^3} = \sqrt{g(\frac{2}{3}E_c)^3}$
- (c)  $y_c = \frac{2}{3}E_c = V_c^2/g = \sqrt{q^2/g}$
- (d)  $V_c/\sqrt{gy_c} = N_F = 1$
- (e) El flujo tranquilo o subcrítico se produce cuando  $N_F < 1$  e  $y/y_c > 1$ .
- (f) El flujo rápido o supercrítico se produce cuando  $N_F > 1$  e  $y/y_c < 1$ .

29. Un canal rectangular conduce  $5.4 \text{ m}^3/\text{seg}$ . Hallar la profundidad crítica  $y_c$  y la velocidad crítica para (a) una anchura de  $3.6 \text{ m}$  y (b) una anchura de  $2.7 \text{ m}$ . (c) ¿Qué pendiente producirá la velocidad crítica en (a) si  $n = 0.020$ ?

**Solución:**

- (a)  $y_c = \sqrt[3]{q^2/g} = \sqrt[3]{(5.4/3.6)^2/9.8} = 0.612 \text{ m.} \quad V_c = \sqrt{gy_c} = \sqrt{9.8 \times 0.612} = 2.45 \text{ m/seg.}$
- (b)  $y_c = \sqrt[3]{q^2/g} = \sqrt[3]{(5.4/2.7)^2/9.8} = 0.742 \text{ m.} \quad V_c = \sqrt{gy_c} = \sqrt{9.8 \times 0.742} = 2.70 \text{ m/seg.}$
- (c)  $V_c = \frac{1}{n}R^{2/3}S^{1/2}, \quad 2.45 = \frac{1}{0.020}(\frac{3.6 \times 0.612}{4.824})^{2/3}S^{1/2}, \quad S = 0.00683.$

30. Un canal trapezoidal cuyas paredes tienen una pendiente de 2 horizontal sobre 1 vertical transporta un caudal de  $16 \text{ m}^3/\text{seg}$ . Si la solera del canal tiene una anchura de  $3.6 \text{ m}$ , calcular (a) la profundidad crítica y (b) la velocidad crítica.

**Solución:**

(a) El Area  $A_c = 3.6y_c + 2(\frac{1}{2}y_c \times 2y_c) = 3.6y_c + 2y_c^2$ , y anchura de superficie  $b' = 3.6 + 4y_c$ .

La expresión (5) del Problema 27 da  $\frac{(16)^2}{9.8} = \frac{(3.6y_c + 2y_c^2)^3}{3.6 + 4y_c}$ .

Resolviendo esta ecuación por aproximaciones sucesivas,  $y_c = 1.035$  m.

(b) La velocidad crítica  $V_c$  se determina mediante la ecuación (6) del Problema 27.

$$V_c = \sqrt{\frac{gA_c}{b'}} = \sqrt{\frac{9.8(3.726 + 2.142)}{3.6 + 4.14}} = 2.73 \text{ m/seg}$$

Como comprobación, haciendo  $y = y_c = 1.035$ ,  $V_c = Q/A_c = 16/[3.6(1.035) + 2(1.035)^2] = 2.73$  m/seg.

**31.** Un canal trapezoidal tiene una solera de 6 m de anchura, la pendiente de las paredes es de 1 sobre 1 y el agua circula a una profundidad de 1.00 m. Para  $n = 0.015$  y un caudal de  $10 \text{ m}^3/\text{seg}$ , calcular (a) la pendiente normal, (b) la pendiente crítica y la profundidad crítica para  $10 \text{ m}^3/\text{seg}$  y (c) la pendiente crítica a la profundidad normal de 1.00 m.

**Solución:**

$$(a) \quad Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S_N^{1/2}, \quad 10 = (6 + 1) \left( \frac{1}{0.015} \right) \left( \frac{7}{6 + 2\sqrt{2}} \right)^{2/3} S_N^{1/2}, \quad S_N = 0.000626$$

$$(b) \quad V' = \frac{Q}{A} = \frac{10}{6y + y^2} \quad \text{y} \quad V_c = \sqrt{\frac{gA_c}{b'}} = \sqrt{\frac{9.8(6y_c + y_c^2)}{6 + 2y_c}}$$

Igualando los términos de velocidad, operando y simplificando, obtenemos,

$$\frac{[y_c(6 + y_c)]^3}{3 + y_c} = 20.4$$

que, resolviendo por aproximaciones sucesivas, da la profundidad crítica  $y_c = 0.634$  m.

La pendiente crítica  $S_c$  se calcula aplicando la ecuación de Manning:

$$10 = [6(0.634) + (0.634)^2] \left( \frac{1}{0.015} \right) \left( \frac{6(0.634) + (0.634)^2}{6 + 2(0.634\sqrt{2})} \right)^{2/3} S_c^{1/2}, \quad S_c = 0.0029$$

Si esta pendiente se mantiene uniforme, el flujo será crítico con una profundidad crítica de 0.634 m y con un  $Q = 10 \text{ m}^3/\text{seg}$ .

(c) De (a), para  $y_N = 1.00$  m.  $R = 0.793$  m y  $A = 7.00 \text{ m}^2$ . Por otra parte, aplicando la ecuación (6) del Problema 27,

$$V_c = \sqrt{gA/b'} = \sqrt{9.8(7.00)/[6 + 2(1)]} = 2.928 \text{ m/seg}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación de Manning, tenemos

$$2.928 = (1/0.015)(0.793)^{2/3} S_c^{1/2}, \quad S_c = 0.00263$$

Esta pendiente producirá un flujo crítico uniforme en el canal trapezoidal a una profundidad de 1.00 m. Se observará que en este caso el caudal será  $Q = AV = 7.00(2.928) = 20.496 \text{ m}^3/\text{seg}$ .

**32.** Un canal rectangular de 9 m de ancho transporta  $7.30 \text{ m}^3/\text{seg}$  con una profundidad de 0.90 m. (a) ¿Cuál es la energía específica? (b) Determinar si el flujo es subcrítico o supercrítico.

**Solución:**

$$(a) \quad E = y + \frac{V^2}{2g} = y + \frac{1}{2g} \left( \frac{Q}{A} \right)^2 = 0.90 + \frac{1}{19.6} \left( \frac{7.30}{9 \times 0.90} \right)^2 = 0.941 \text{ m (kg m/m)}.$$

$$(b) \quad y_c = \sqrt[3]{q^2/g} = \sqrt[3]{(7.30/9)^2/9.8} = 0.406 \text{ m}.$$

El flujo es subcrítico porque la profundidad del flujo es superior a la profundidad crítica. (Véase Problema 28.)

33. Un canal trapezoidal tiene una anchura de solera de 6 m y las paredes una pendiente de 2 horizontal sobre 1 vertical. Cuando la profundidad del agua es de 1,00 m, el caudal es de  $10 \text{ m}^3/\text{seg.}$  (a) ¿Cuál es la energía específica? (b) El flujo, ¿es subcrítico o supercrítico?

**Solución:**

(a) Area  $A = 6(1,00) + 2(\frac{1}{2})(1,00)(2,00) = 8,00 \text{ m}^2$ .

$$E = y + \frac{1}{2g} \left( \frac{Q}{A} \right)^2 = 1,00 + \frac{1}{19,6} \left( \frac{10}{8} \right)^2 = 1,08 \text{ m}$$

(b) Empleando  $\frac{Q^2}{g} = \frac{A_c^3}{b'}$ ,  $\frac{(10)^2}{9,8} = \frac{(6y_c + 2y_c^2)^3}{6 + 4y_c}$ . Resolviendo por aproximaciones sucesivas,  $y_c = 0,61 \text{ m}$ .

La profundidad real supera a la profundidad crítica, luego el flujo es subcrítico.

34. El caudal que pasa a través de un canal rectangular ( $n = 0,012$ ) de 4,5 m de ancho es de  $10,80 \text{ m}^3/\text{seg}$  cuando la pendiente es de 1 m sobre 100 m. Determinar si el flujo es subcrítico o supercrítico.

**Solución:**

- (1) Se examinan las condiciones críticas para el canal.

$$q_{\max} = 10,80/4,5 = \sqrt{g} y_c^3 \quad \text{e} \quad y_c = 0,838 \text{ m}$$

- (2) La pendiente crítica para la profundidad crítica anterior puede hallarse mediante la fórmula de Chezy-Manning

$$Q = A \frac{1}{n} R^{2/3} S_c^{1/2}$$

$$10,80 = (4,50 \times 0,838) \left( \frac{1}{0,012} \right) \left( \frac{4,50 \times 0,838}{4,50 + 2(0,838)} \right)^{2/3} S_c^{1/2}, \quad S_c = 0,00215 +$$

Puesto que la pendiente del canal *supera* a la crítica, el flujo es supercrítico.

35. Un canal rectangular de 3 m de ancho transporta un caudal de  $12 \text{ m}^3/\text{seg.}$  (a) Tabular (como para preparar un diagrama) la energía específica en función de la profundidad de flujo para profundidades de 0,3 a 2,4 m. (b) Determinar la energía específica mínima. (c) ¿Qué tipo de flujo existe cuando la profundidad es 0,6 m y 2,4 m? (d) Para  $C = 55$ , ¿qué pendientes son necesarias para mantener las profundidades de (c)?

**Solución:**

(a) De  $E = y + \frac{V^2}{2g} = y + \frac{(Q/A)^2}{2g}$  obtenemos:

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| Para $y = 0,30 \text{ m}$ , | $E = 0,30 + \frac{(12/0,90)^2}{2g} = 3,02 \text{ m kg/kg}$ |
| $= 0,60$                    | $= 0,60 + 1,36 = 1,96$                                     |
| $= 0,90$                    | $= 0,90 + 0,907 = 1,807$                                   |
| $= 1,20$                    | $= 1,20 + 0,680 = 1,880$                                   |
| $= 1,50$                    | $= 1,50 + 0,544 = 2,044$                                   |
| $= 1,80$                    | $= 1,80 + 0,453 = 2,253$                                   |
| $= 2,10$                    | $= 2,10 + 0,389 = 2,489$                                   |
| $= 2,40$                    | $= 2,40 + 0,340 = 2,740 \text{ m kg/kg}$                   |

- (b) El valor mínimo de  $E$  está situado entre 1,96 y 1,880 m kg/kg.

Aplicando la ecuación (2) del Problema 27,  $y_c = \sqrt[3]{q^2/g} = \sqrt[3]{(12/3)^2/9,8} = 1,178 \text{ m}$ .

Entonces,  $E_{\min} = E_c = \frac{3}{2}y_c = \frac{3}{2}(1,178) = 1,767 \text{ m kg/kg}$ .

Se observa que  $E = 1,96$  para  $y = 0,60 \text{ m}$  y  $2,04$  a  $1,50 \text{ m}$  de profundidad. La Figura (a) del Problema 27 indica este hecho, o sea, dos profundidades para una energía específica dada cuando el caudal  $Q$  es constante.

- (c) Para 0.6 m de profundidad (por debajo de la profundidad crítica) el flujo es supercrítico y para 2.4 m de profundidad el flujo es subcrítico.

(d)

$$Q = CA\sqrt{RS}$$

Para  $y = 0.6$  m,  $A = 1.8$  m<sup>2</sup> y  $R = 1.8/4.2 = 0.429$  m.  $12 = 55(1.8)\sqrt{0.429S}$  y  $S = 0.0343$ .

Para  $y = 2.4$  m,  $A = 7.2$  m<sup>2</sup> y  $R = 7.2/7.8 = 0.923$  m.  $12 = 55(7.2)\sqrt{0.923S}$  y  $S = 0.000995$ .

- 36.** Una acequia rectangular ( $n = 0.012$ ) se traza con una pendiente de 0.0036 y transporta 16.0 m<sup>3</sup>/seg. En condiciones críticas de flujo, ¿qué anchura deberá tener la acequia?

**Solución:**

Del Problema 28,  $q_{\max} = \sqrt{gy_c^3}$ . De ahí  $16.0/b = \sqrt{9.8y_c^3}$ .

Por aproximaciones sucesivas se comprueba el caudal calculado frente al caudal dado.

**Tanteo 1.** Haciendo  $h = 2.5$  m,  $y_c = \sqrt[3]{(16.0/2.5)^2/9.8} = 1.61$  m.

Entonces,  $R = A/p = (2.5 \times 1.61)/5.72 = 0.704$  m

$$\text{y } Q = AV = (2.5 \times 1.61) \left[ \frac{1}{0.012} (0.704)^{2/3} (0.0036)^{1/2} \right] = 15.9 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

**Tanteo 2.** Puesto que el caudal debe aumentarse, hagamos  $h = 2.53$  m.

Entonces,  $y_c = \sqrt[3]{(16.0/2.53)^2/9.8} = 1.60$  m,  $R = (2.53 \times 1.60)/5.73 = 0.706$  m

$$\text{y } Q = AV = (2.53 \times 1.60) \left[ \frac{1}{0.012} (0.706)^{2/3} (0.0036)^{1/2} \right] = 16.0 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

Este resultado es probablemente de suficiente exactitud.

- 37.** Para una energía específica constante e igual a 1.98 m kg/kg, ¿qué caudal máximo deberá pasar por un canal rectangular de 3.00 m de ancho?

**Solución:**

Profundidad crítica  $y_c = \frac{2}{3}E = \frac{2}{3}(1.98) = 1.32$  m. (Véase ecuación (1) del Problema 28.)

Velocidad crítica  $V_c = \sqrt{gy_c} = \sqrt{9.8 \times 1.32} = 3.60$  m/seg y

Caudal máximo  $Q = AV = (3.00 \times 1.32)(3.60) = 14.2$  m<sup>3</sup>/seg.

Aplicando  $q_{\max} = \sqrt{gy_c^3}$  [ecuación (b) del Problema 28], obtenemos

Caudal máximo  $Q = bq_{\max} = 3.00\sqrt{9.8(1.32)^3} = 14.2$  m<sup>3</sup>/seg.

- 38.** Por un canal rectangular de 6 m de ancho,  $n = 0.025$ , circula agua a 1.50 m de profundidad con una pendiente de 14.7 m sobre 10.000 m. A lo ancho del canal se construye un vertedero sin contracciones C, de 0.735 m de altura ( $n = 1.90$ ). Tomando la elevación de la solera del canal justamente aguas arriba del vertedero como 30.00, estimar (usando un tramo) la elevación de la superficie del agua en el punto A, 300 m aguas arriba del vertedero.

**Solución:**

Se calcula la nueva elevación de la superficie del agua en B en la Fig. 10-7 (la profundidad en el sentido de la corriente disminuye). Se observa que el flujo es no uniforme puesto que las profundidades, velocidades y áreas no son constantes desde el momento en que se instala el vertedero.

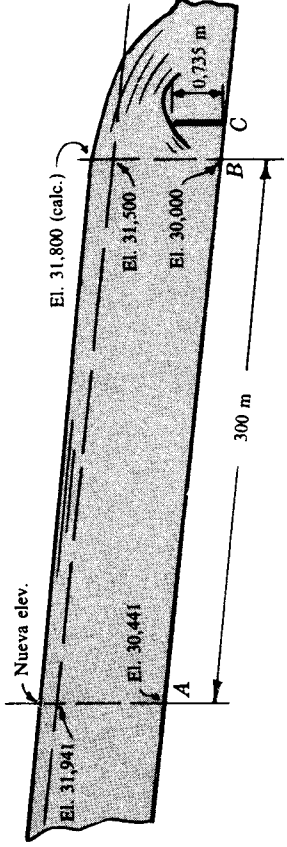


Fig. 10-7

$$Q = (6 \times 1,50)(1/0,025)(9/9)^{2/3}(0,00147)^{1/2} = 13,80 \text{ m}^3/\text{seg}$$

Para una profundidad supuesta de 1,80 m justo aguas arriba del vertedero.

$$\text{Velocidad de aproximación } V = Q/A = 13,80/(6 \times 1,8) = 1,28 \text{ m/seg}$$

La fórmula del vertedero da  $13,80 = 1,90 \times 6[(H + \frac{(1,28)^2}{2g})^{3/2} - (\frac{(1,28)^2}{2g})^{3/2}]$ . Luego

$$(H + 0,0836)^{3/2} = 1,210 + 0,024 = 1,234 \text{ y } H = 1,066 \text{ m}$$

$$\text{Altura } Z = 0,735 \text{ m}$$

Profundidad  $y = 1,801 \text{ m}$  (hipótesis comprobada)

La nueva elevación en  $A$  debe estar comprendida entre 31,941 y 32,241. Ensayando una elevación de 32,10 (y comprobando en la ecuación de Bernoulli),

$$\text{Nueva área en } A = 6(32,10 - 30,44) = 9,96 \text{ m}^2 \text{ y } V = 13,80/9,96 = 1,39 \text{ m/seg.}$$

$$\text{Velocidad media} = \frac{1}{2}(1,28 + 1,39) = 1,33 \text{ m/seg.}$$

$$\text{Radio hidráulico medio } R = \frac{1}{2}(10,80 + 9,96)/[\frac{1}{2}(9,60 + 9,32)] = 110 \text{ m.}$$

$$\text{Pérdida de carga } h_L = (\frac{Vn}{R^{2/3}})^2 L = (\frac{1,33 \times 0,025}{(1,10)^{2/3}})^2 (300) = 0,292 \text{ m.}$$

Aplicando ahora la ecuación de Bernoulli entre  $A$  y  $B$ , tomando  $B$  como referencia,

$$32,10 + (1,39)^2/2g = 31,80 + (1,28)^2/2g$$

$$31,91 = 31,88 \text{ (aproximadamente)}$$

que se reduce a

La diferencia de 0,03 m está dentro del error del factor de rugosidad  $n$ . Por consiguiente, no se precisa mayor aproximación. Se empleará, pues, la elevación de 32,10 m.

39. Desarrollar una fórmula que relacione la longitud, energía y pendiente para flujo no uniforme en el caso de problemas similares al precedente.

#### Solución:

Aplicando la ecuación de la energía entre las secciones 1 y 2 en la dirección del flujo, tomando como referencia la sección inferior a la solera del canal, obtenemos

$$\begin{aligned} \text{energía en 1} - \text{pérdida de carga} &= \text{energía en 2} \\ (z_1 + y_1 + V_1^2/2g) - h_L &= (z_2 + y_2 + V_2^2/2g) \end{aligned}$$

La pendiente de la línea de alturas totales  $S$  es  $h_L/L$ ; entonces,  $h_L = SL$ . La pendiente de la solera del canal  $S_0$  es  $(z_1 - z_2)/L$ ; luego  $z_1 - z_2 = S_0 L$ . Reagrupando y sustituyendo,

$$S_0 L + (y_1 - y_2) + (V_1^2/2g - V_2^2/2g) = SL$$

Esta expresión se resuelve generalmente para la longitud  $L$  en estudios de canales abiertos. Así, pues,

$$L \text{ en m} = \frac{(y_1 + V_1^2/2g) - (y_2 + V_2^2/2g)}{S - S_0} = \frac{E_1 - E_2}{S - S_0} \quad (A)$$

Los siguientes problemas ilustrarán la aplicación de la expresión (A).

40. Una acequia rectangular ( $n = 0,013$ ) tiene 1,80 m de ancho y transporta  $1,78 \text{ m}^3/\text{seg}$  de agua. En una cierta sección  $F$  la profundidad es de 0,96 m. Si la pendiente de la solera del canal es constante e igual a 0,000400, determinar la distancia que hay entre la sección  $F$  y la sección donde la profundidad es 0,81 m. (Emplear un tramo.)

**Solución:**

Se supone que la sección cuya profundidad es 0,81 m está *aguas arriba* de  $F$ . Empleamos los subíndices 1 y 2 como es usual.

$$A_1 = 1,80(0,81) = 1,458 \text{ m}^2, \quad V_1 = 1,782/1,458 = 1,221 \text{ m/seg}, \quad R_1 = 1,458/3,42 = 0,426 \text{ m}$$

$$A_2 = 1,80(0,96) = 1,728 \text{ m}^2, \quad V_2 = 1,782/1,728 = 1,032 \text{ m/seg}, \quad R_2 = 1,728/3,72 = 0,465 \text{ m}$$

De ahí,  $V_{\text{media}} = 1,126 \text{ m/seg}$  y  $R_{\text{medio}} = 0,445 \text{ m}$ . Entonces para flujo no uniforme,

$$L = \frac{(V_2^2/2g + y_2) - (V_1^2/2g + y_1)}{S_0 - S} = \frac{(0,055 + 0,96) - (0,077 + 0,81)}{0,000400 - \left(\frac{0,013 \times 1,126^2}{(0,445)^{2/3}}\right)} = -556,5 \text{ m}$$

El signo menos significa que la sección cuya profundidad es 0,81 m está *aguas abajo* de  $F$  y no *aguas arriba* como se ha supuesto.

Estos problemas ilustran cómo debe emplearse el método. Una mayor precisión se obtendría suponiendo profundidades intermedias de 0,900 m y 0,855 m (o profundidades exactas por interpolación de valores), calculando valores de  $\Delta L$  y sumando éstos. De esta forma debe calcularse una *curva de perfil*. La curva de perfil no es una línea recta.

41. Un canal rectangular de 12 m de ancho conduce  $25 \text{ m}^3/\text{seg}$  de agua. La pendiente del canal es 0,00283. En la sección 1 la profundidad es 1,35 m y en la sección 2, 90 m *aguas abajo*, la profundidad es 1,50 m. ¿Cuál es el valor medio del factor de rugosidad  $n$ ?

**Solución:**

$$A_2 = 12(1,50) = 18 \text{ m}^2, \quad V_2 = 25/18 = 1,39 \text{ m/seg}, \quad R_2 = 18/15 = 1,20 \text{ m}$$

$$A_1 = 12(1,35) = 16,20 \text{ m}^2, \quad V_1 = 25/16,20 = 1,54 \text{ m/seg}, \quad R_1 = 16,20/14,70 = 1,10 \text{ m}$$

De ahí,  $V_{\text{media}} = 1,465 \text{ m/seg}$  y  $R_{\text{medio}} = 1,15 \text{ m}$ . Para flujo no uniforme,

$$L = \frac{(V_2^2/2g + y_2) - (V_1^2/2g + y_1)}{90} = \frac{(0,0984 + 1,500) - (0,1215 + 1,350)}{90}$$

$$S_0 - \left(\frac{nV}{R^{2/3}}\right)^2 \quad 0,0283 - \left(\frac{n \times 1,465}{(1,15)^{2/3}}\right)^2$$

y  $n = 0,0282$ .

42. Un canal rectangular de 6 m de ancho tiene una pendiente de 1 m por 1000 m. La profundidad en la sección 1 es 2,550 m y en la sección 2, 600 m *aguas abajo*, la profundidad es 3,075 m. Si  $n = 0,011$ , determinar el caudal probable en  $\text{m}^3/\text{seg}$ .

**Solución:**

Empleando como referencia el plano del techo de la corriente en la sección 2,

$$\text{energía en 1} = y_1 + V_1^2/2g + z_1 = 2,550 + V_1^2/2g + 0,600$$

$$\text{energía en 2} = y_2 + V_2^2/2g + z_2 = 3,075 + V_2^2/2g + 0$$

La caída de la línea de alturas totales = energía en 1 - energía en 2. Puesto que el valor es desconocido, se supondrá un valor de la pendiente.

$$\text{Pendiente } S = \frac{\text{pérdida de carga}}{L} = \frac{(3,150 - 3,075) + (V_1^2/2g - V_2^2/2g)}{600} \quad (1)$$

Se supone que  $S = 0,000144$ . Por otra parte son necesarios los valores de  $A_{\text{media}}$  y  $R_{\text{medio}}$

$$A_1 = 6(2,550) = 15,300 \text{ m}^2, \quad R_1 = 15,300/11,10 = 1,38 \text{ m}$$

$$A_2 = 6(3,075) = 18,450 \text{ m}^2, \quad R_2 = 18,450/12,15 = 1,52 \text{ m}$$

De ahí,  $A_{\text{media}} = 16,875 \text{ m}^2$  y  $R_{\text{medio}} = 1,45 \text{ m}$ .

**(1) Primera aproximación.**

$$Q = A_m(1/n)R_m^{2/3}S^{1/2} = 16,875(1/0,011)(1,45)^{2/3}(0,000144)^{1/2} = 23,58 \text{ m}^3/\text{seg}$$

En la ecuación (1) anterior se comprueba el valor de la pendiente  $S$ :

$$V_1 = 23,58/15,30 = 1,54, \quad V_1^2/2g = 0,121$$

$$V_2 = 23,58/18,45 = 1,28, \quad V_2^2/2g = 0,083$$

$$S = \frac{(3,150 - 3,075) + 0,038}{600} = 0,000188$$

El gradiente de la línea de altura total es de 0,113 m en 600 m, superior al valor supuesto.

**(2) Segunda aproximación.**

$$\text{Haciendo } S = 0,000210, \quad Q = 23,58\left(\frac{0,000210}{0,000144}\right)^{1/2} = 28,50 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

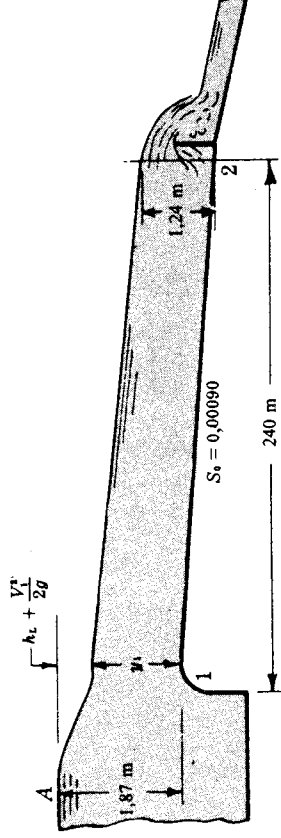
$$\text{Comprobando, } V_1 = 28,50/15,30 = 1,86 \text{ m/seg, } V_1^2/2g = 0,177 \text{ m}$$

$$V_2 = 28,50/18,45 = 1,54 \text{ m/seg, } V_2^2/2g = 0,122 \text{ m}$$

$$S = \frac{(3,150 - 3,075) + 0,055}{600} = 0,000217$$

Esta pendiente comprueba (razonablemente) la hipótesis hecha. Por consiguiente,  $Q$  aproximado = 28, m<sup>3</sup>/seg.

- 43.** Un depósito alimenta un canal rectangular de 4,50 m de ancho y  $n = 0,015$ . A la entrada, la profundidad de agua en el depósito es de 1,87 m por encima de la solera del canal. (Véase la Fig. 10-8) El canal tiene 240 m de longitud y un desnivel de 0,216 m en esa longitud. La profundidad de un vertedero situado en el extremo de descarga del canal es de 1,24 m. Determinar, empleando un solo tramo, la capacidad del canal suponiendo que la pérdida a la entrada es  $0,25V_1^2/2g$ .



**Fig. 10-8**

**Solución:**

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre  $A$  y 1, tomando como referencia 1, tenemos

$$(0 + \text{despr.} + 1,87) - 0,25V_1^2/2g = (0 + V_1^2/2g + y_1)$$

$$y \quad L = \frac{(V_2^2/2g + y_2) - (V_1^2/2g + y_1)}{S_o - \left(-\frac{nV_m}{R_m^{2/3}}\right)^2}$$

Estas ecuaciones se resuelven por aproximaciones sucesivas hasta que  $L$  se aproxime o iguale a 240

Haciendo  $y_1 = 1,50$  m, de (1) se tiene  $V_1^2/2g = (1,87 - 1,50)/1,25 = 0,296$  m,  $V_1 = 2,41$  m/seg y  $q$   
 $y_1 V_1 = 1,50(2,41) = 3,61$  m<sup>3</sup>/seg,  $V_2 = 3,61/1,24 = 2,91$  m<sup>3</sup>/seg.

$$V_{\text{media}} = \frac{1}{2}(2.41 + 2.91) = 2.66 \text{ m/seg}$$

$$R_{\text{medio}} = \frac{1}{2}[(R_1 + R_2) = \frac{1}{2}[(4.5 \times 1.50)/7.5 + (4.5 \times 1.24)/6.98] = 0.85 \text{ m}$$
 Sustituyendo en la ecuación (2) anterior, hallamos  $L = 113 \text{ m}$ .

Se aumenta el valor de  $y_1$  a 1,60 m y se repiten los cálculos. Los resultados en forma tabulada son:

| $y_1$ | $V_1$ | $q_1$ | $V_2$ | $V_m$ | $R_m$ | $L$   | Notas                   |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------------|
| 1,60  | 2,06  | 3,30  | 2,66  | 2,36  | 0,867 | 345 m | se disminuye $y_1$      |
| 1,57  | 2,17  | 3,40  | 2,75  | 2,46  | 0,862 | 246 m | resultado satisfactorio |

La capacidad del canal =  $3,40 \times 4,5 = 15,30 \text{ m}^3/\text{seg}$ .

Si se requiriese mayor precisión, se comienza por el extremo inferior  $y$ , para un caudal por unidad de anchura  $q = 3,40 \text{ m}^3/\text{seg}$ , se halla la longitud del tramo en el punto en que la profundidad sea aproximadamente un 10 % mayor que 1,24, o sea, aproximadamente 1,36 m, luego a una profundidad de 1,48 m, y así sucesivamente. Si la suma de las longitudes excede de 240 m, se disminuye el valor de  $y_1$ , obteniendo un valor mayor de  $q$ .

#### 44. Deducir la expresión que da la pendiente de la superficie de un líquido en canales rectangulares anchos para flujo gradualmente no uniforme.

##### Solución:

La energía total por kilogramo de fluido con respecto a un plano arbitrario de referencia es

$$H = y + V^2/2g + z$$

donde el factor de corrección de la energía cinética  $\alpha$  se toma como la unidad. Derivando esta expresión con respecto a  $L$ , distancia a lo largo del canal, se tiene

$$\frac{dH}{dL} = \frac{dy}{dL} + \frac{d(V^2/2g)}{dL} + \frac{dz}{dL} \quad (A)$$

Para canales rectangulares (o para canales anchos de profundidad media  $y_m$ ),  $V^2 = (q/y)^2$  y

$$\frac{d(q^2/2gy^2)}{dL} = -\frac{2q^2}{2gy^3} \left( \frac{dy}{dL} \right) = -\frac{V^2}{gy} \left( \frac{dy}{dL} \right)$$

Sustituyendo en (A), haciendo  $dH/dL = -S$  (pendiente de la línea de alturas totales), y  $dz/dL = -S_0$  (pendiente de la solera del canal), obtenemos

$$-S = \frac{dy}{dL} - \frac{V^2}{gy} \left( \frac{dy}{dL} \right) - S_0 \quad \text{o} \quad \frac{dy}{dL} = \frac{S_0 - S}{(1 - V^2/gy)} = \frac{S_0 - S}{1 - N_F^2} \quad (B)$$

El término  $dy/dL$  representa la pendiente de la superficie del agua respecto a la solera del canal. Cuando el canal se inclina hacia abajo en la dirección del flujo,  $S_0$  es positivo. Análogamente,  $S$  es positivo (siempre). Para flujo uniforme  $S = S_0$  y  $dy/dL = 0$ .

Otra forma de la ecuación (B) puede obtenerse como se indica a continuación. La fórmula de Manning es

$$Q = (1/n)AR^{2/3}S^{1/2}$$

Resolviendo, esta ecuación para la pendiente de la línea de alturas totales, haciendo  $q = Q/b$ ,  $A = by$  y  $R = y$  para canales rectangulares anchos, se obtiene

$$\frac{dH}{dL} = S = \frac{n^2(q^2 b^2/b^2 y^2)}{y^{4/3}}$$

Análogamente, la pendiente de la solera del canal, en función de la profundidad normal  $y_N$  y del coeficiente  $n_N$ , puede escribirse de la forma

$$\frac{dz}{dL} = S_0 = \frac{n_N^2(q^2 b^2/b^2 y_N^2)}{y_N^{4/3}}$$

Entonces la ecuación (B) se transforma en

$$-\frac{n^2(q^2 b^2/b^2 y^2)}{y^{4/3}} = (1 - V^2/gy) \frac{dy}{dL} - \frac{n_N^2(q^2 b^2/b^2 y_N^2)}{y_N^{4/3}}$$



Pero  $V^2 = q^2/y^2$ ,  $n \cong n_N$  y  $q^2/g = y_c^3$ . Entonces,

$$\frac{-n^2 q^2}{y_N^{10/3}} = \frac{dy}{dL} (1 - y_c^3/y^3) - \frac{n^2 q^2}{y_N^{10/3}} \quad (C)$$

$$\frac{dy}{dL} = \frac{(nq)^2 [1/y_N^{10/3} - 1/y^{10/3}]}{1 - (y_c/y)^3} \quad (D)$$

Haciendo  $Q/b = q = y_N [(1/n)y_N^{2/3} S_o^{1/2}]$  o  $(nq)^2 = y_N^{10/3} S_o$ , la ecuación (D) se convierte en

$$\frac{dy}{dL} = S_o \left[ \frac{1 - (y_N/y)^{10/3}}{1 - (y_c/y)^3} \right] \quad (E)$$

Hay condiciones límites para los perfiles superficiales. Por ejemplo, cuando  $y$  se aproxima a  $y_c$ , el denominador de (E) tiende hacia cero. Por consiguiente,  $dy/dL$  se hace infinito y las curvas cortan perpendicularmente a la línea de profundidad crítica. De ahí que los perfiles de superficie en las proximidades de  $y = y_c$  sean solo aproximados.

Análogamente, cuando  $y$  se aproxima a  $y_N$ , el numerador tiende a cero. Por tanto, las curvas tienden asintóticamente a la profundidad normal.

Finalmente, cuando  $y$  tiende a cero, el perfil de superficie se aproxima a la solera del canal perpendicularmente, lo que es imposible bajo la condición referente al flujo gradualmente no uniforme.

45. Resumir el sistema de clasificación de perfiles superficiales para flujo gradualmente no uniforme en canales anchos.

**Solución:**

Existe un cierto número de diferentes condiciones en un canal que dan origen a unos doce tipos distintos de flujo no uniforme. En la expresión (E) del Problema 44, para valores positivos de  $dy/dL$ , la profundidad  $y$  aumenta aguas abajo a lo largo del canal, y para valores negativos de  $dy/dL$  la profundidad  $y$  disminuirá aguas abajo a lo largo del canal.

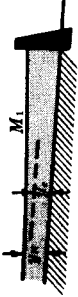
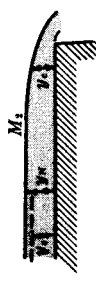
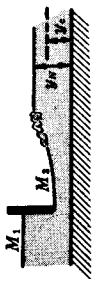
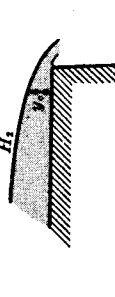
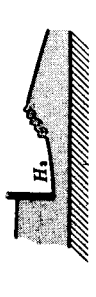
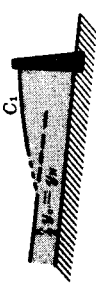







En la tabla que sigue se presenta un resumen de los doce tipos diferentes de flujo no uniforme. Algunos de ellos se examinarán aquí y el lector puede analizar los tipos restantes de flujo de manera similar.

La clasificación «suave» resulta de la pendiente del canal  $S_o$ , siendo tal que la profundidad normal  $y_N > y_c$ . Si la profundidad  $y$  es mayor que  $y_N$  e  $y_c$ , la curva se llama «tipo 1»; si la profundidad  $y$  está comprendida entre  $y_N$  e  $y_c$ , tipo 2; y si la profundidad  $y$  es menor que  $y_N$  e  $y_c$ , tipo 3.

Se observará que, para las curvas del tipo 1, puesto que la velocidad es decreciente debido al aumento de la profundidad, la superficie del agua debe aproximarse a una asíntota horizontal (véase  $M_1$ ,  $C_1$  y  $S_1$ ). Análogamente, las curvas que se acercan a la línea de profundidad normal lo hacen también asintóticamente. Como se ha dicho anteriormente, las curvas que se aproximan a la línea de profundidad crítica cortan a ésta perpendicularmente, puesto que el denominador de la expresión (E) del Problema 44 se hace cero en tales casos. Sin embargo, las curvas para pendientes críticas son una excepción a las afirmaciones anteriores ya que es imposible tener una superficie de agua al mismo tiempo tangente y perpendicular a la línea de profundidad crítica.

En cada perfil de la siguiente tabla la escala vertical está muy ampliada respecto a la escala horizontal. Como se indica en los problemas numéricos para las curvas  $M_1$ , tales perfiles pueden tener cientos de metros de extensión.

La tabla siguiente da las relaciones entre pendientes y profundidades, el signo de  $dy/dL$ , el tipo de perfil, el símbolo del perfil, el tipo de flujo, y un esquema representando la forma del perfil. Los valores de  $y$  dentro de cada perfil pueden observarse que son mayores o menores que  $y_N$  y/o  $y_c$  examinando cada esquema.

| Pendiente del canal                     | Relaciones de profundidad | $\left(\frac{dy}{dL}\right)$ | Prof. en el sent. de la corriente | Símbolo | Tipo de flujo     | Forma del perfil  |
|---|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|---------|-------------------|---|
| Suave<br>$0 < S < S_c$                  | $y > y_N > y_c$           | +                            | Aumenta                           | $M_1$   | Subcrítico        |    |
|   | $y_N > y > y_c$           | -                            | Disminuye                         | $M_2$   | Subcrítico        |    |
|   | $y_N > y_c > y$           | +                            | Aumenta                           | $M_3$   | Supercrítico      |    |
| Horizontal<br>$S = 0$<br>$y_N = \infty$ | $y > y_c$                 | -                            | Disminuye                         | $H_2$   | Subcrítico        |    |
|   | $y_c > y$                 | +                            | Aumenta                           | $H_3$   | Supercrítico      |    |
|   | $y > y_c = y_N$           | +                            | Aumenta                           | $C_1$   | Subcrítico        |    |
| Crítica<br>$S_N = S_c$<br>$y_N = y_c$   | $y_c = y = y_N$           | +                            | Constante                         | $C_2$   | Uniforme, crítico |   |
|   | $y_c = y_N > y$           | +                            | Aumenta                           | $C_3$   | Supercrítico      |  |
|   | $y > y_c > y_N$           | +                            | Aumenta                           | $S_1$   | Subcrítico        |  |
| Pronunciada<br>$S > S_c > 0$            | $y_c > y > y_N$           | -                            | Disminuye                         | $S_2$   | Supercrítico      |  |
|   | $y_c > y_N > y$           | +                            | Aumentar                          | $S_3$   | Supercrítico      |  |
|   | $y > y_c$                 | -                            | Disminuye                         | $A_2$   | Subcrítico        |  |
| Adversa<br>$S < 0$<br>$y_N = \infty$    | $y_c > y$                 | +                            | Aumenta                           | $A_3$   | Supercrítico      |  |

46. Desarrollar para un canal rectangular una expresión que dé la relación entre las profundidades antes y después de un resalto hidráulico. (Véase la Figura 10-9.)

**Solución:**

Para el volumen libre comprendido entre las secciones 1 y 2, considerando una anchura de canal unidad y un caudal por unidad de anchura  $q$ ,

$$P_1 = w\bar{h}A = u(\tfrac{1}{2}V_1)V_1 = \tfrac{1}{2}wV_1^2 \quad \text{y análogamente} \quad P_2 = \tfrac{1}{2}wV_2^2$$

Aplicando el principio de la cantidad de movimiento,

$$\Delta P_x \, dt = \Delta \text{ cantidad de movimiento} = \frac{W}{g} (\Delta V_x)$$

$$\tfrac{1}{2}w(y_2^2 - y_1^2)dt = \frac{wq \, dt}{g} (V_1 - V_2)$$

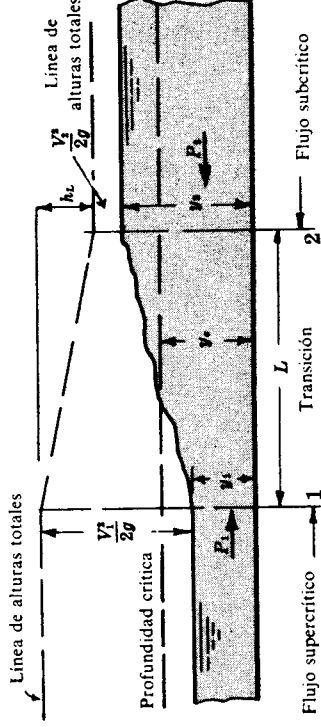


Fig. 10-9

Puesto que  $V_2 y_2 = V_1 y_1$  y  $V_1 = q/y_1$ , la ecuación anterior se convierte en

$$q^2/g = \tfrac{1}{2}V_1 y_2 (V_1 + y_2) \quad (1)$$

$$\text{Como } q^2/g = y_c^3, \quad y_c^3 = \tfrac{1}{2}V_1 y_2 (V_1 + y_2) \quad (2)$$

La longitud del resalto se establece de manera que varíe entre  $4,3y_2$  y  $5,2y_2$ .

Para la relación entre  $L/y_2$  y el número de Froude  $V_1/\sqrt{gy_1}$ , véase página 73 de *Engineering Hydraulics*, Hunter Rouse, John Wiley & Sons, 1950.

El resalto hidráulico es un dissipador de energía. En el diseño de cuencos protectores de resalto hidráulico es importante conocer la longitud del resalto y la profundidad  $y_2$ . Una buena disposición de energía se tiene cuando  $V_1^2/gy_1 = 20$  a 80.

47. Un canal rectangular de 6 m de ancho transporta  $11 \text{ m}^3/\text{seg}$  de agua y descarga en una solera protectora de 6 m de ancho, de pendiente nula, a una velocidad media de  $6 \text{ m/seg}$ . ¿Cuál es la altura del resalto hidráulico? ¿Qué energía se absorbe (pérdida) en el resalto?

**Solución:**

(a)  $V_1 = 6 \text{ m/seg}$ ,  $q = 11/6 = 1,833 \text{ m}^3/\text{seg/m}$  de anchura, e  $y = q/V_1 = 0,306 \text{ m}$ . Entonces,

$$q^2/g = \tfrac{1}{2}V_1 y_2 (V_1 + y_2), \quad (1,833)^2/9,8 = \tfrac{1}{2}(0,306)y_2(0,306 + y_2), \quad 2,245 = 0,306y_2 + y_2^2$$

de donde  $y_2 = -1,659 \text{ m}$ ,  $+1,353 \text{ m}$ . Siendo extraña la raíz negativa,  $y_2 = 1,353 \text{ m}$  y la altura del resalto hidráulico es  $(1,353 - 0,306) = 1,047 \text{ m}$ .

Se observa que  $y_c = \sqrt[3]{(1,833)^2/9,8}$  o  $\sqrt[3]{\tfrac{1}{2}V_1 y_2 (V_1 + y_2)} = 0,70 \text{ m}$ .

Por consiguiente, el flujo a  $0,306 \text{ m}$  de profundidad es supercrítico y a  $1,353 \text{ m}$ , subcrítico.

(b) Antes del resalto,  $E_1 = V_1^2/2g + y_1 = (6)^2/2g + 0.306 = 2.143 \text{ m kg/kg}$ .

Después del resalto,  $E_2 = V_2^2/2g + y_2 = [11/(6 \times 1.353)]^2/2g + 1.353 = 1.447 \text{ m kg/kg}$ .

Pérdida de energía por segundo =  $wQH = 1000(11)(2.143 - 1.447) = 7656 \text{ m kg/seg}$ .

48. Un canal rectangular de 4.80 m de ancho transporta un caudal de  $5.20 \text{ m}^3/\text{seg}$ . La profundidad aguas abajo del resalto hidráulico es 1.26 m. (a) ¿Cuál es la profundidad aguas arriba? (b) ¿Cuál es la pérdida de carga?

**Solución:**

(a)  $q^2/g = \frac{1}{2}y_1y_2(y_1 + y_2), \quad (5.20/4.80)^2/9.8 = 0.63y_1(y_1 + 1.26), \quad y_1 = 0.135 \text{ m}$

(b)  $A_1 = 4.80(0.135) = 0.648 \text{ m}^2, \quad V_1 = 5.20/0.648 = 8.025 \text{ m/seg}$

$A_2 = 4.80(1.26) = 6.048 \text{ m}^2, \quad V_2 = 5.20/6.048 = 0.860 \text{ m/seg}$

$E_1 = V_1^2/2g + y_1 = (8.025)^2/2g + 0.135 = 3.421 \text{ m kg/kg}$

$E_2 = V_2^2/2g + y_2 = (0.860)^2/2g + 1.26 = 1.298 \text{ m kg/kg}$

Pérdida de energía =  $3.421 - 1.298 = 2.123 \text{ m kg/kg o m}$ .

49. Después de pasar por el aliviadero de una presa,  $243 \text{ m}^3/\text{seg}$  pasan a través de un cuenco de hormigón ( $n = 0.013$ ) plano. La velocidad del agua en la base del aliviadero es de  $12.60 \text{ m/seg}$  y la anchura del cuenco es 54 m. Estas condiciones producirán un resalto hidráulico, siendo 3.00 m la profundidad en el canal situado después del cuenco. A fin de que el resalto esté dentro del cuenco, (a) ¿con qué longitud deberá construirse el cuenco? (b) ¿Cuánta energía se pierde desde el pie del aliviadero hasta la sección de aguas abajo del resalto?

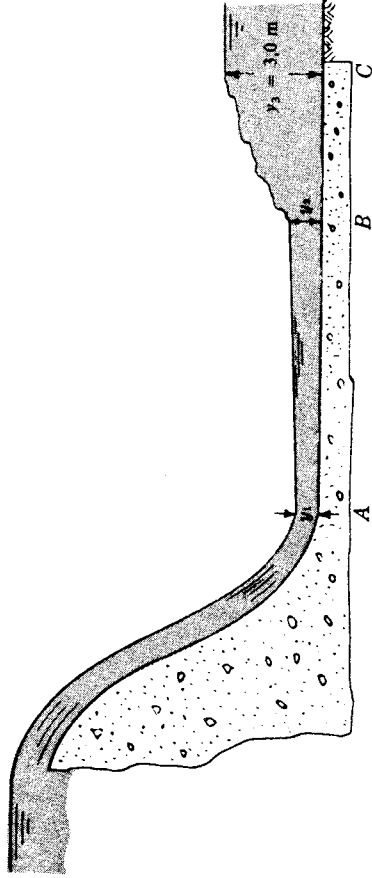


Fig. 10-10

**Solución:**

(a) Según la Fig. 10-10, primero se calcula la profundidad  $y_2$  en el extremo aguas arriba del resalto.

$$q^2/g = \frac{1}{2}y_2y_3(y_2 + y_3), \quad (243/54)^2/9.8 = \frac{1}{2}(3)y_2(y_2 + 3), \quad y_2 = 0.405 \text{ m}$$

Por otra parte,

$$y_1 = q/V_1 = (243/54)/12.6 = 0.357 \text{ m}$$

Ahora se calcula la longitud  $L_{AB}$  del flujo retardado

$$V_1 = 12.60 \text{ m/seg}, \quad V_1^2/2g = 8.10 \text{ m}, \quad R_1 = (54 \times 0.357)/54.714 = 0.352 \text{ m}$$

$$V_2 = q/y_2 = 4.50/0.405 = 11.11 \text{ m/seg}, \quad V_2^2/2g = 6.30 \text{ m}, \quad R_2 = (54 \times 0.405)/54.81 = 0.399 \text{ m}$$

De ahí,  $V_{\text{media}} = 11,855 \text{ m/seg}$ ,  $R_{\text{medio}} = 0,376 \text{ m}$ , y

$$L_{AB} = \frac{(V_1^2/2g + y_2) - (V_1^2/2g + y_1)}{S_o - S} = \frac{(6,30 + 0,405) - (8,10 + 0,357)}{0 - (-\frac{0,013 \times 11,855}{(0,376)^{2/3}})^2} = 20,0 \text{ m}$$

La longitud del resalto  $L_R$  entre  $B$  y  $C$  está comprendida entre  $4,3y_3$  y  $5,2y_3 \text{ m}$ . Suponiendo el valor conservativo de  $5,0y_3$ ,

$$L_R = 5,0 \times 3,0 = 15,0 \text{ m}$$

Por consiguiente, longitud total  $ABC = 20,0 + 15,0 = 35,0 \text{ m}$  (aproximadamente).

(b) Energía en  $A = y_1 + V_1^2/2g = 0,357 + 8,100 = 8,457 \text{ m kg/kg}$ .

Energía en  $C = y_3 + V_3^2/2g = 3,000 + (1,5)^2/2g = 3,115 \text{ m kg/kg}$ .

Pérdida total de energía  $= uQH = 1000(243)(5,342) = 1,40 \times 10^6 \text{ m kg/kg}$ .

50. Con el fin de que el resalto hidráulico situado después de un aliviadero no se desplace aguas abajo establecer la relación entre las variables indicadas en la Fig. 10-11. (El profesor E. A. Elevators sugiere el empleo de parámetros adimensionales, como se hace a continuación. Véase «Civil Engineering», agosto de 1958.)

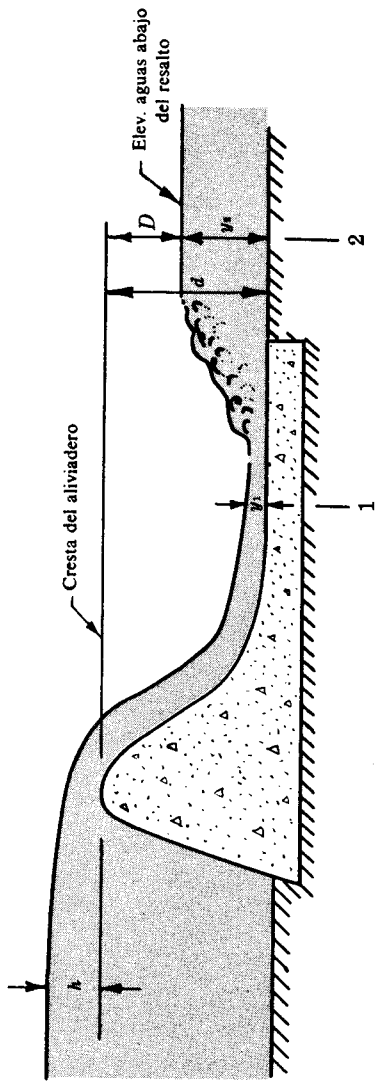


Fig. 10-11

#### Solución:

La ecuación de energía se aplica entre una sección aguas arriba de la presa donde  $h$  puede medirse y la sección 1, despreciando la altura de velocidad de aproximación, o sea,

$$(h + d) + 0 + \text{despr.} - \text{pérdidas (despreciadas)} = 0 + 0 + V_1^2/2g$$

$$\text{o } V_1 = \sqrt{2g(h + d)}.$$

$$\text{Como } q = y_1 V_1 \text{ (m}^3\text{/seg/m de ancho)}, y_1 = \frac{q}{V_1} = \frac{q}{\sqrt{2g(h + d)}}$$

$$\text{o } y_1 = \frac{q}{\sqrt{2g(d/h + 1)^{1/2} h^{1/2}}} \quad (A)$$

Del Problema 46, la relación del resalto hidráulico es

$$\frac{y_2^3 - y_1^3}{y_1} = \frac{qV_1}{g} \left( \frac{y_2 - y_1}{y_2} \right) \quad \text{o } gy_1^2 + gy_2 = 2qV_1$$

$$\text{Despejando,} \quad y_2 = \frac{-y_1 \pm \sqrt{y_1^2 + 8qV_1/g}}{2}$$

Dividiendo por  $y_1$  se tiene una expresión adimensional

$$\frac{y_2}{y_1} = -\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{1 + 8qV_1/y_1^3} \quad = \quad \frac{1}{2} [\sqrt{1 + 8q^2/gy_1^3} - 1] \quad (B)$$

Puesto que  $y_2 = (d - D)$ ,  $v_2/v_1 = (d - D)/y_1$  se sustituye en (B) junto con el valor de  $y_1$  de (A)

$$\frac{d - D}{y_1} = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{1 + 8q^2/gy_1^3} - 1 \right]$$

$$\frac{2(d - D)\sqrt{2g}(d/h + 1)^{1/2}h^{1/2}}{q} + 1 = \sqrt{1 + \frac{8(2^{3/2})(g^{3/2})(d/h + 1)^{3/2}h^{3/2}}{qg}}$$

La ecuación se pone en forma adimensional multiplicando el primer miembro por  $h/h$ , dividiendo ambos miembros por  $\sqrt{8}$  y agrupando términos:

$$\left( \frac{h^{3/2}g^{1/2}}{q} \right) \left( \frac{d - D}{h} \right) \left( \frac{d}{h} + 1 \right)^{1/2} + 0,353 = \sqrt{\frac{8}{8} + 2,828 \left( \frac{g^{1/2}h^{3/2}}{q} \right) \left( \frac{d}{h} + 1 \right)^{3/2}} \quad (C)$$

Los términos adimensionales en (C) pueden escribirse así:

$$\pi_1 = \frac{h^{3/2}g^{1/2}}{q}, \quad \pi_2 = \frac{D}{h}, \quad \pi_3 = \frac{d}{h}$$

Entonces la ecuación (C) se convierte en

$$\pi_1(\pi_3 - \pi_2)(\pi_3 + 1)^{1/2} + 0,353 = \sqrt{\frac{8}{8} + 2,828\pi_1(\pi_3 + 1)^{3/2}} \quad (D)$$

El profesor Elevatorski ha preparado una gráfica de la ecuación (D) que permite deducir una fácil solución. Para valores calculados de  $\pi_1$  y  $\pi_2$ , la gráfica da el valor de  $\pi_3$ . (Véase «Civil Engineering», agosto de 1958).

El profesor Elevatorski, al comentar la omisión de la pérdida de energía sobre la cara del aliviadero, dice que «al despreciar la pérdida debida a la fricción se producirá un ligero exceso del nivel de agua en el cuenco protector. Un resalto ligeramente inundado es mejor disipador de energía comparado con otro diseñado para la profundidad  $y_2$ ».

**51.** Determinar la elevación del cuenco de un aliviadero si  $q = 5 \text{ m}^3/\text{seg}/\text{m}$ ,  $h = 3 \text{ m}$ ,  $D = 21 \text{ m}$ , y la cresta del aliviadero tiene una elevación de 60 m.

**Solución:**

Empleando las relaciones adimensionales deducidas en el problema precedente,

$$\pi_1 = g^{1/2}h^{3/2}/q = 3,13(3^{3/2})/5 = 3,253, \quad \pi_2 = D/h = 21/3 = 7,00, \quad \pi_3 = d/h = d/3$$

La ecuación (D) del Problema 50 puede escribirse entonces de la forma

$$3,253(d/3 - 7,000)(d/3 + 1)^{1/2} + 0,353 = \sqrt{0,125 + 2,828(3,253)(d/3 + 1)^{3/2}}$$

Resolviendo por aproximaciones sucesivas para  $\pi_3 = d/3$ , hallamos  $\pi_3 = 77,4$ , o  $d = 25,8 \text{ m}$ . La elevación del cuenco del aliviadero es  $(60 - 25,8) = 34,2 \text{ m}$  por encima del plano de referencia.

**52.** Establecer la ecuación que da el caudal a través de un vertedero de pared gruesa suponiendo que no existen pérdidas de carga.

**Solución:**

En la sección donde se produce el flujo crítico,  $q = V_c y_c$ . Pero  $y_c = V_c^2/g = \frac{2}{3}E_c$  y  $V_c = \sqrt{g(\frac{2}{3}E_c)}$ . Por consiguiente, el valor teórico del caudal  $q$  es

$$q = \sqrt{g(\frac{2}{3}E_c)} \times \frac{2}{3}E_c = 1,70E_c^{3/2}$$

Sin embargo, el valor de  $E_c$  es difícil de medir con precisión porque la profundidad crítica es difícil de localizar. La ecuación práctica es

$$q = CH^{3/2} \cong 1,67H^{3/2}$$

El vertedero se calibrará en el lugar de utilización para obtener resultados precisos.

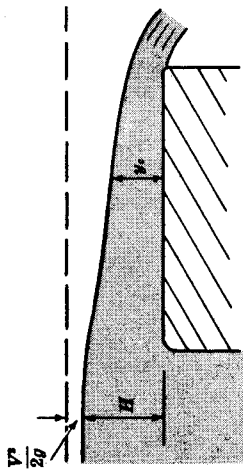


Fig. 10-12

53. Desarrollar una expresión para un caudalímetro crítico e ilustrar el uso de la fórmula.

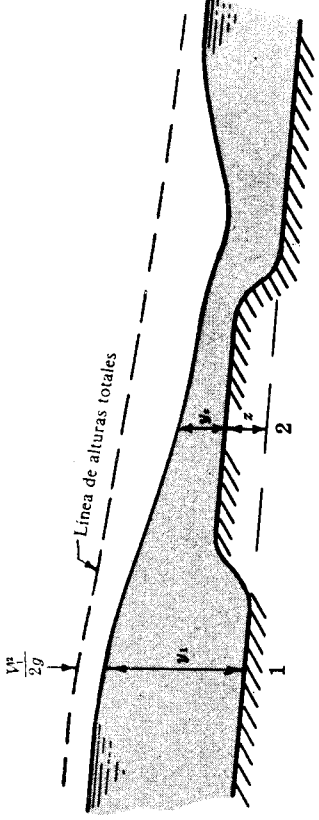


Fig. 10-13

**Solución:**

Un método excelente para medir el caudal en canales abiertos es por medio de un estrechamiento. La medida de la profundidad crítica no es necesaria. La profundidad  $y_1$  se mide a una distancia corta aguas arriba del estrechamiento. La solera construida tendrá aproximadamente  $3y_c$  de largo y una altura igual a la de velocidad crítica.

Para un canal rectangular de anchura constante, la ecuación de Bernoulli se aplica entre las secciones 1 y 2, en donde la pérdida de carga en flujo acelerado se toma como un décimo de la diferencia de alturas de velocidad, es decir,

$$y_1 + \frac{V_1^2}{2g} - \frac{1}{10} \left( \frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \right) = \left( y_c + \frac{V_c^2}{2g} + z \right)$$

en donde se desprecia la ligera pendiente en el lecho del canal entre 1 y 2. Admitiendo que  $E_c = y_c + V_c^2/2g$  y agrupando términos, obtenemos

$$(y_1 + 1,10V_1^2/2g) = [z + 1,0E_c + \frac{1}{10}(\frac{1}{2}E_c)]$$

$$(y_1 - z + 1,10V_1^2/2g) = 1,033E_c = 1,033(\frac{3}{2}\sqrt{\frac{3}{2}}\sqrt{q^2/g})$$

$$q = 1,62(y_1 - z + 1,10V_1^2/2g)^{3/2} \quad (A)$$

$$\text{Como } q = V_1 y_1, \quad q = 1,62y_1 - z + 0,0561(q^2/y_1^2)^{3/2} \quad (B)$$

Para ilustrar la aplicación de la expresión (B), consideremos un canal rectangular de 3 m de ancho con un medidor de profundidad crítica que tiene como dimensión  $z = 0,330$  m. Si la profundidad medida  $y_1$  es 0,726 m, ¿cuál es el caudal  $Q$ ?

En una primera aproximación se desprecia el último término de (B). Entonces,

$$q = 1,62(0,726 - 0,330)^{3/2} = 0,404 \text{ m}^3/\text{seg/m de ancho}$$

Ahora, aplicando por completo la ecuación (B), por aproximaciones sucesivas hallamos  $q = 0,435$ . Por consiguiente,

$$Q = q(3) = 0,435(3) = 1,305 \text{ m}^3/\text{seg}$$

## Problemas propuestos

54. Designando por  $y_N$  la profundidad en la figura del Problema 1, deducir una expresión para el flujo laminar a lo largo de una placa plana de anchura infinita, considerando el volumen libre en el Problema 1 con anchura unidad.  
*Sol.*  $y_N^2 = 3\nu V/gS$
55. El factor de fricción de Darcy  $f$  se asocia generalmente a tuberías. Sin embargo, para el problema precedente, evaluar el factor de Darcy  $f$ , empleando la solución dada para dicho problema. *Sol.*  $96/R_E$
56. Demostrar que la velocidad media  $V$  puede expresarse de la forma  $0,32v_* R^{1/6}/n$ .
57. Demostrar que los factores  $n$  de Manning y  $f$  de Darcy se relacionan entre sí por la expresión  $n = 0,113^{1/2} R^{1/6}$ .
58. Calcular la velocidad media en el canal rectangular del Problema 7 sumando el área bajo la curva profundidad-velocidad. *Sol.* 2,087 m/seg
59. ¿Con qué pendiente se trazaría el canal representado en la Fig. 10-14 para transportar  $14,80 \text{ m}^3/\text{seg}$ ? ( $C = 55$ .)  
*Sol.* 0,00407

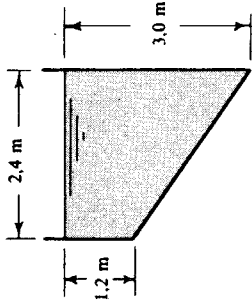


Fig. 10-14

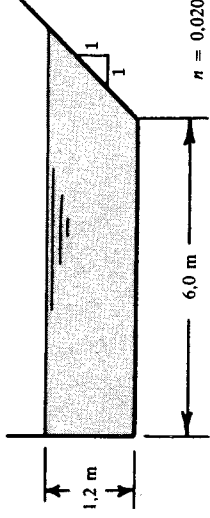


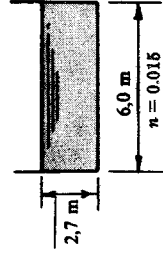
Fig. 10-15

60. El canal representado en la Fig. 10-15 se traza con una pendiente de 0,00016. Cuando llega a un desnivel, el flujo se transporta mediante dos tuberías de hormigón ( $n = 0,012$ ) trazadas con una pendiente de 2,5 m sobre 1000 m. ¿Qué dimensión deberán tener las tuberías? *Sol.* 1,245 m
61. Por un canal semicircular circula un caudal de  $2,20 \text{ m}^3/\text{seg}$ . El canal tiene 1200 m de largo y un desnivel de 0,6 m en esa longitud. Aplicando la fórmula de Manning y  $n = 0,012$ , determinar las dimensiones.  
*Sol.*  $1,952 \text{ m} \times 0,976 \text{ m}$
62. Circula agua a una profundidad de 1,90 m en un canal rectangular de 2,45 m de ancho. La velocidad media es de 0,58 m/seg. ¿Con qué pendiente probable estará trazado el canal si  $C = 55$ ? *Sol.* 0,000149
63. Un canal labrado en roca ( $n = 0,030$ ) es de sección trapezoidal con una anchura de solera de 6 m y una pendiente de los lados de 1 sobre 1. La velocidad media permitida es de 0,75 m/seg. ¿Qué pendiente del canal producirá  $5,40 \text{ m}^3/\text{seg}$ ? *Sol.* 0,00067
64. ¿Cuál es el caudal de agua en una tubería de alcantarillado vitrificado nueva de 60 cm de diámetro, estando la tubería semillena y teniendo una pendiente de 0,0025? *Sol.*  $0,153 \text{ m}^3/\text{seg}$
65. Un canal ( $n = 0,017$ ) tiene una pendiente de 0,00040 y una longitud de 3000 m. Suponiendo que el radio hidráulico es 1,44 m, ¿qué corrección debe realizarse en la pendiente para producir el mismo caudal si el factor de rugosidad cambia a 0,020? *Sol.* Nueva  $S = 0,000554$
66. ¿Qué profundidad tendrá el flujo de agua en una acequia en V con ángulo de  $90^\circ$  ( $n = 0,013$ ), trazada con una pendiente de 0,00040 si transporta  $2,43 \text{ m}^3/\text{seg}$ ? *Sol.* 1,54 m
67. Para construir una acequia de sección triangular se emplea madera aserrada. ¿Cuál deberá ser el ángulo en el vértice para poder transportar el máximo caudal con una pendiente dada? *Sol.*  $90^\circ$
68. Por un canal rectangular de 6 m de ancho,  $n = 0,013$  y  $S = 0,0144$ , circula agua con una profundidad de 0,9 m. ¿Qué profundidad tendría para poder transportar el mismo caudal con una pendiente de 0,00144? *Sol.* 1,98 m
69. Una acequia desagua  $1,20 \text{ m}^3/\text{seg}$  con una pendiente de 0,50 m sobre 1000 m. La sección es rectangular y el factor de rugosidad  $n = 0,012$ . Determinar las dimensiones óptimas, o sea, las dimensiones que dan el menor perímetro mojado. *Sol.*  $0,778 \text{ m} \times 1,556 \text{ m}$

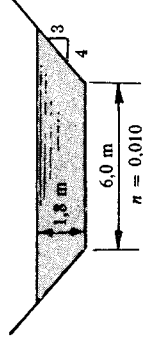


70. Un canal rectangular revestido, de 5 m de anchura, transporta un caudal de  $11,50 \text{ m}^3/\text{seg}$  con una profundidad de 0,85 m. Hallar  $n$  si la pendiente del canal es de 1,0 m sobre 500 m. (Aplicar la fórmula de Manning  
Sol. 0,0122

71. Hallar la tensión cortante media sobre el perímetro mojado, en el Problema 70. Sol.  $1,269 \text{ kg/m}^2$
72. Aplicando la fórmula de Manning, demostrar que la profundidad teórica para una velocidad máxima en un conducto circular es 0,81 veces el diámetro.
73. Diseñar el canal trapezoidal óptimo para transportar  $17 \text{ m}^3/\text{seg}$  a una velocidad máxima de  $1,00 \text{ m}/\text{seg}$ . Emplea  $n = 0,025$  y como pendiente de las paredes 1 vertical sobre 2 horizontal. Sol.  $y = 2,622 \text{ m}$ ,  $b = 1,238 \text{ m}$
74. Calcular la pendiente del canal del problema anterior. Sol. 0,000436
75. ¿Cuál de los dos canales representados en la Fig. 10-16 conducirá el mayor caudal si ambos están trazados con la misma pendiente? Sol. (a) Sección trapezoidal



(a)



(b)

Fig. 10-16

76. Una alcantarilla de sección cuadrada tiene 2,4 m de lado y se instala según se indica en la Fig. 10-17. ¿Cuál es el radio hidráulico si la profundidad es 2,3 m? Sol. 0,70 m

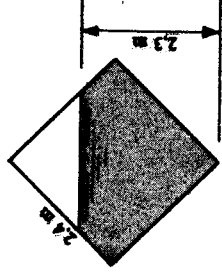


Fig. 10-17

77. ¿Cuál es el radio de la acequia semicircular B, representada en la Fig. 10-18, si su pendiente  $S = 0,0200$  y  $C = 50$ ? Sol.  $r = 0,538 \text{ m}$

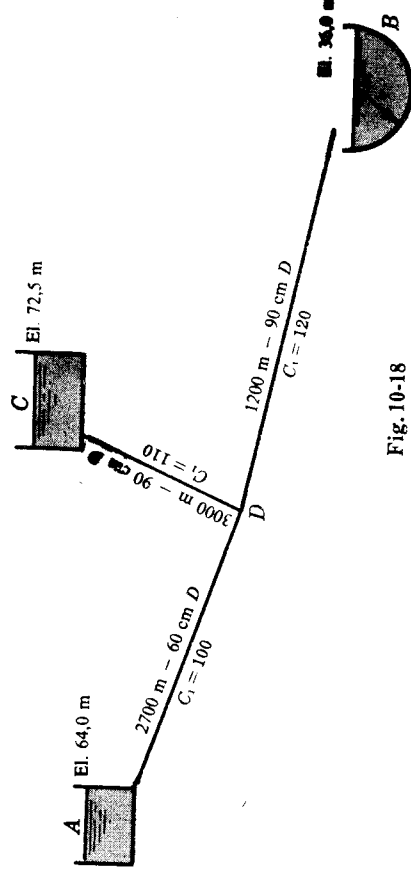


Fig. 10-18

78. Calcular la energía específica cuando circula un caudal de  $6 \text{ m}^3/\text{seg}$  por un canal rectangular de 3 m de ancho con una profundidad de 0,90. Sol. 1,152 m
79. Calcular la energía específica cuando circula un caudal de  $8,4 \text{ m}^3/\text{seg}$  por un canal trapezoidal cuya solera tiene 2,4 m de ancho, las pendientes de las paredes 1 sobre 1 y la profundidad 1,17 m. Sol. 1,38 m
80. Una tubería de alcantarillado de 1,8 m de diámetro interior transporta un caudal de  $2,18 \text{ m}^3/\text{seg}$  cuando la profundidad es de 1,2 m. ¿Cuál es la energía específica? Sol. 1,275 m
81. En el Problema 78, ¿con qué profundidades debe circular el caudal de  $6 \text{ m}^3/\text{seg}$  para que la energía específica sea  $1,5 \text{ m}$  kg/kg? ¿Cuál es la profundidad crítica? Sol. 0,438 m y 1,395 m, 0,742 m
82. En un canal rectangular de 3 m de ancho el caudal es de  $7,16 \text{ m}^3/\text{seg}$ . Con profundidades de 0,6 m, 0,9 m y 1,2 m, determinar si el flujo es subcrítico o supercrítico. Sol. Supercrítico, subcrítico, subcrítico
83. En un canal rectangular de 3 m de ancho el caudal es de  $7,16 \text{ m}^3/\text{seg}$  cuando la velocidad es de  $2,4 \text{ m}/\text{seg}$ . Determinar la naturaleza del flujo. Sol. Subcrítico

84. Para una profundidad crítica de 0,966 m en un canal rectangular de 3 m de ancho, calcular el caudal.  
*Sol.* 8,92 m<sup>3</sup>/seg
85. Determinar la pendiente crítica de un canal rectangular de 6 m de ancho y  $n = 0,012$ , cuando el caudal es de 26,5 m<sup>3</sup>/seg.  
*Sol.* 0,00208
86. Un canal trapezoidal, cuyas paredes tienen una pendiente de 1 sobre 1, transporta un caudal de 20 m<sup>3</sup>/seg. Para una anchura de solera de 4,8 m, calcular la velocidad crítica.  
*Sol.* 3,03 m/seg
87. Un canal rectangular de 1800 m de longitud, 18 m de ancho y 3 m de profundidad transporta 54 m<sup>3</sup>/seg de agua ( $C = 40$ ). La limpieza del canal hace que aumente  $C$  a 55. Si la profundidad en el extremo superior permanece en 3 m, hallar la profundidad en el extremo inferior para el mismo caudal (aplicando un solo tramo).  
*Sol.*  $y_2 = 3,274$  m
88. Un canal rectangular ( $n = 0,016$ ) trazado con una pendiente de 0,0064 transporta 16 m<sup>3</sup>/seg de agua. En condiciones de flujo crítico, ¿qué anchura deberá tener el canal?  
*Sol.* 2,54 m
89. Un canal rectangular ( $n = 0,012$ ) de 3 m de ancho y trazado con una pendiente de 0,0049, transporta 4,5 m<sup>3</sup>/seg de agua. Para producir un flujo crítico, el canal se contrae. ¿Qué anchura deberá tener la sección contraída para cumplir esta condición si se desprecian las pérdidas producidas en la gradual reducción de anchura?  
*Sol.* 1,335 m
90. En un canal rectangular de 3,6 m de ancho,  $C = 55$ ,  $S = 0,0225$ , el caudal es de 13,5 m<sup>3</sup>/seg. La pendiente del canal cambia a 0,00250. ¿A qué distancia del punto de cambio de pendiente se tendrá la profundidad de 0,825 m? (Empléese un tramo.)  
*Sol.* 31,50 m
91. Usando los datos del Problema 90, (a) calcular la profundidad crítica en el canal más plano, (b) calcular la profundidad requerida para tener flujo uniforme en el canal más plano, (c) calcular la profundidad justamente antes del resalto hidráulico, aplicando la ecuación del Problema 46. (Se observa que esta profundidad ocurre a 31,50 m del cambio de pendiente, según el Problema 90.)  
*Sol.* 1,125 m, 1,512 m, 0,825 m
92. Un vertedero de pared gruesa tiene una altura de 0,40 m sobre la solera de un canal rectangular de 3 m de ancho. La altura de carga medida por encima de la cresta del vertedero es de 0,60 m. Determinar el caudal aproximado en el canal. (Emplear  $c = 0,92$ .)  
*Sol.* 2,35 m<sup>3</sup>/seg
93. Demostrar que la profundidad crítica en un canal rectangular es  $2V_c^2/g$ .
94. Demostrar que la profundidad crítica en un canal triangular puede expresarse como  $4/5$  de la energía específica mínima.
95. Demostrar que la profundidad crítica en un canal parabólico es  $3/4$  de la energía específica mínima si las dimensiones del canal son  $y_c$  de profundidad y  $b'$  de anchura de la superficie de agua.
96. Para un canal rectangular, demostrar que el caudal  $q$  por metro de anchura es igual a  $1,704E_{\min}^{3/2}$ .
97. Para un canal triangular, demostrar que el caudal  $Q = 0,6335(b'/y_c)E_{\min}^{5/2}$ .
98. Para un canal parabólico, demostrar que el caudal  $Q = 1,1068b'E_{\min}^{3/2}$ .

# Capítulo 11

## Fuerzas desarrolladas por los fluidos en movimiento

### INTRODUCCION

El conocimiento de las fuerzas ejercidas por los fluidos en movimiento son de gran importancia en el análisis y diseño de dispositivos tales como bombas, turbinas, aviones, cohetes, hélices, barcos, cuerpos en movimiento, edificios y multitud de dispositivos hidráulicos. Las ecuaciones fundamentales de la energía no son suficientes para resolver la mayoría de estos problemas. Es más decisivo el empleo de otro principio de la mecánica, el de la cantidad de movimiento. La teoría de la capa límite proporciona una nueva base para un análisis más minucioso. La experimentación, cada vez más continua y extensa, proporciona sin cesar nuevos datos para conocer las leyes de variación de los coeficientes fundamentales.

### EL PRINCIPIO DEL IMPULSO-CANTIDAD DE MOVIMIENTO de la dinámica establece que

Impulso = variación de la cantidad de movimiento

$$0 \quad (\Sigma F)t = M(\Delta V)$$

Las magnitudes físicas que intervienen en la ecuación son magnitudes vectoriales y han de tratarse de acuerdo con el álgebra vectorial. Por lo general, es más conveniente utilizar componentes, y para evitar posibles errores en los signos se sugiere utilizar las siguientes formas:

(a) En la dirección  $X$ ,

cantidad de movimiento inicial  $\pm$  impulso = cantidad de movimiento final

$$MV_{x_1} \pm \Sigma F_x \cdot t = MV_{x_2} \quad (1)$$

(b) En la dirección  $Y$ ,

$$MV_{y_1} \pm \Sigma F_y \cdot t = MV_{y_2} \quad (2)$$

donde  $M$  = masa cuya cantidad de movimiento varía en el tiempo  $t$ .

Estas expresiones pueden escribirse, utilizando los subíndices apropiados  $x$ ,  $y$  o  $z$ , en la siguiente forma:

$$\Sigma F_x = \rho Q(V_2 - V_1)_x, \quad \text{etc.} \quad (3)$$

**EL COEFICIENTE DE CORRECCION DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO**  $\beta$ , que se calculará en el Problema 1, es

$$\beta = \frac{1}{A} \int_A (v/V)^2 dA \quad (4)$$

Para flujo laminar en tuberías,  $\beta = 1.33$ . Para flujo turbulento en tuberías,  $\beta$  varía de 1.01 a 1.07. En la mayoría de los casos puede considerarse igual a la unidad.

## RESISTENCIA

La resistencia o arrastre es la componente de la fuerza resultante, ejercida por el fluido sobre el cuerpo en dirección *paralela* al movimiento relativo del fluido. Usualmente se da en la forma

$$\text{Resistencia en kg} = C_D \rho A \frac{V^2}{2} \quad (5)$$

## SUSTENTACION

La sustentación es la componente de la fuerza resultante, ejercida por el fluido sobre el cuerpo en dirección *perpendicular* al movimiento relativo del fluido. Usualmente se da en la forma

$$\text{Sustentación en kg} = C_L \rho A \frac{V^2}{2} \quad (6)$$

donde

$C_D$  = coeficiente de resistencia, adimensional

$C_L$  = coeficiente de sustentación, adimensional

$\rho$  = densidad del fluido, en UTM/m<sup>3</sup>

$A$  = un área característica, en m<sup>2</sup>, que normalmente es la proyección del cuerpo sobre un plano perpendicular al movimiento relativo del fluido

$V$  = velocidad relativa del fluido respecto del cuerpo, en m/seg.

## RESISTENCIA TOTAL

La resistencia total está originada por la resistencia superficial y la resistencia de forma, debida a la presión. No obstante, muy raramente se presentan ambos efectos simultáneamente con el mismo orden de magnitud. En el caso de objetos, que no sufren una sustentación apreciable, la resistencia del perfil o superficial es sinónima de resistencia total.

| <i>Objeto</i>   | <i>Resistencia superficial</i> | <i>Resistencia de forma</i> | <i>Resistencia total</i> |
|---|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 1. Esferas.   | despreciable                   | + resistencia de forma      | = resistencia total      |
| 2. Cilindros (eje perpendicular a la velocidad).            | despreciable                   | + resistencia de forma      | = resistencia total      |
| 3. Discos y placas delgadas (perpendicular a la velocidad). | cero                           | + resistencia de forma      | = resistencia total      |
| 4. Placas delgadas (paralelas a la velocidad).              | resistencia superficial +      | despreciable o nula         | = resistencia total      |
| 5. Objetos fluidodinámicos.                                 | resistencia superficial +      | pequeña o despreciable      | = resistencia total      |

## COEFICIENTES DE RESISTENCIA

Los coeficientes de resistencia dependen del número de Reynolds para las velocidades bajas e intermedias, y se hacen independientes de dicho número para velocidades elevadas. Para velocidades muy altas el coeficiente de resistencia depende del número de Mach, cuya influencia es despreciable a velocidades bajas. Los Diagramas  $F$ ,  $G$  y  $H$  dan las variaciones de los coeficientes de resistencia para algunas formas geométricas. En los Problemas 24 y 40 se estudian estas relaciones.

Para placas planas y perfiles de ala, los coeficientes de resistencia se tabulan, usualmente, para el área de la placa y para el producto de la cuerda por la longitud, respectivamente.

## COEFICIENTES DE SUSTENTACION

Kutta ha determinado teóricamente los valores máximos de los coeficientes de sustentación para placas planas delgadas, en posición no perpendicular a la velocidad relativa del fluido, por

$$C_L = 2\pi \text{ sen } \alpha \quad (7)$$

donde  $\alpha$  = ángulo de ataque o ángulo que forma la placa con la velocidad relativa del fluido. Para los ángulos normales de funcionamiento, las secciones de los perfiles de ala actuales dan valores del 90 % aproximadamente del valor máximo teórico. El ángulo  $\alpha$  no deberá exceder de 25° aproximadamente.

## NUMERO DE MACH

El número de Mach es una relación adimensional, que viene dada por el cociente de la velocidad del fluido por la velocidad del sonido (llamada más frecuentemente celeridad).

$$\text{Número de Mach} = N_M = \frac{V}{c} = \frac{V}{\sqrt{E/\rho}} \quad (8)$$

Para gases,  $c = \sqrt{kgRT}$  (véase Capítulo 1).

Para valores de  $V/c$  hasta el valor crítico de 1,0 el flujo es subsónico; para el valor 1,0 el flujo es sónico y para valores mayores que 1,0 el flujo es supersónico (véase Diagrama *H*).

## TEORIA DE LA CAPA LIMITE

La teoría de la capa límite fue introducida por Prandtl. Esta teoría establece que, para un fluido en movimiento, todas las pérdidas por fricción tienen lugar en una delgada capa adyacente al contorno del sólido (llamada capa límite), y que el flujo exterior a dicha capa puede considerarse como carente de viscosidad. La distribución de velocidades en la zona próxima al contorno es influenciada por la tensión cortante en el contorno. En general, la capa límite es muy delgada en la parte de aguas arriba del contorno y va aumentando su espesor hacia aguas abajo por la acción continuada de las tensiones cortantes.

Para números de Reynolds bajos, toda la capa límite es gobernada por la acción de las fuerzas viscosas y en su interior el flujo es laminar. Para valores intermedios del número de Reynolds la capa límite es laminar cerca de la superficie del contorno y turbulenta en las zonas algo más alejadas. Para valores del número de Reynolds muy elevados la capa límite es totalmente turbulenta.

## PLACAS PLANAS

En el caso de una placa plana de *L* m de longitud, mantenida paralela al movimiento relativo del fluido, se aplican las siguientes ecuaciones.

### 1. Capa límite laminar (hasta números de Reynolds alrededor de 500.000).

$$(a) \text{ Coeficiente de resistencia medio } (C_D) = \frac{1,328}{\sqrt{R_E}} = \frac{1,328}{\sqrt{VL/\nu}} \quad (9)$$

$$(b) \text{ Espesor de la capa límite } \delta \text{ (en m) a una distancia genérica } x \text{ viene dada por} \\ \frac{\delta}{x} = \frac{5,20}{\sqrt{R_{E_x}}} = \frac{5,20}{\sqrt{Vx/\nu}} \quad (10)$$

$$(c) \text{ Tensión cortante } \tau_0 \text{ en kg/m}^2; \text{ se calcula por} \\ \tau_0 = 0,33 \rho V^{3/2} \sqrt{\nu/x} = 0,33 (\mu V/x) \sqrt{R_{E_x}} = \frac{0,33 \rho V^2}{\sqrt{R_{E_x}}} \quad (11)$$

donde  $V$  = velocidad de aproximación del fluido al contorno (velocidad no perturbada)

$x$  = distancia al borde de ataque en m

$L$  = longitud total de la placa en m

$R_{E_x}$  = número de Reynolds local para la distancia  $x$ .

Como ponen de manifiesto las fórmulas dadas, el espesor de la capa límite es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la longitud  $x$  y a la raíz cuadrada de la viscosidad cinemática e inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la velocidad. Análogamente, la tensión cortante en la superficie del contorno  $\tau_0$  es directamente proporcional a la raíz cuadrada del producto de  $\rho$  y  $\mu$  y a la potencia tres medios de  $V$  e inversamente proporcional a la raíz cuadrada de  $x$ .

## 2. Capa límite turbulenta (contorno liso).

$$(a) \text{ Coeficiente de resistencia medio } (C_D) = \frac{0,074}{R_E^{0,20}} \quad \text{para } 2 \times 10^5 < R_E < 10^7 \quad (12)$$

$$= \frac{0,455}{(\lg_{10} R_E)^{2,58}} \quad \text{para } 10^6 < R_E < 10^9 \quad (13)$$

Para contornos rugosos, el coeficiente de resistencia varía con la rugosidad relativa  $\epsilon/L$  y no con el número de Reynolds.

K. E. Schoenherr ha sugerido el empleo de la fórmula  $1/\sqrt{C_D} = 4,13 \lg (C_D R_{E_x})$ , ecuación considerada de mayor precisión que las (12) y (13), particularmente para números de Reynolds por encima de  $2 \times 10^7$ .

(b) El espesor  $\delta$  de la capa límite se calcula mediante

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0,38}{R_{E_x}^{0,20}} \quad \text{para } 5 \times 10^4 < R_E < 10^6 \quad (14)$$

$$= \frac{0,22}{R_{E_x}^{0,167}} \quad \text{para } 10^6 < R_E < 5 \times 10^8 \quad (15)$$

(c) La tensión cortante en la pared se estima por

$$\tau_0 = \frac{0,023 \rho V^2}{((\delta V/\nu)^{1/4})} = 0,0587 \frac{V^2}{2} \rho \left( \frac{\nu}{xV} \right)^{1/5} \quad (16)$$

## 3. Capa límite en la transición de laminar a turbulenta sobre la placa ( $R_E$ de 500.000 a 20.000.000, aproximadamente).

$$(a) \text{ Coeficiente de resistencia medio } (C_D) = \frac{0,455}{(\lg_{10} R_E)^{2,58}} - \frac{1700}{R_E} \quad (17)$$

El Diagrama  $G$  ilustra la variación de  $C_D$  con el número de Reynolds para estos tres regímenes del flujo.

## GOLPE DE ARIETE

El golpe de ariete es un término que se utiliza para describir el choque producido por una súbita disminución en la velocidad del fluido. En una tubería, al cerrar una válvula, el tiempo que tarda la onda de presión en viajar aguas arriba hasta la embocadura de la tubería y volver aguas abajo hasta la válvula viene dado por

$$\text{Tiempo en seg} = 2 \times \frac{\text{longitud de la tubería en m}}{\text{celeridad de la onda de presión en m/seg}}$$

$$T = \frac{2L}{c} \quad (18)$$

El aumento de presión producido por el cierre rápido de una válvula se calcula por

$$\text{Variación de presión en kg/m}^2 = \text{densidad} \times \text{celeridad} \times \text{variación de velocidad} \quad (19)$$

$$dp = \rho \, c \, dV \quad \text{o bien} \quad dh = c \, dV/g$$

donde  $dh$  es la variación de la altura de presión.

Para tuberías rígidas, la celeridad de la onda de presión es

$$c = \sqrt{\frac{\text{módulo de elasticidad volumétrico en kg/m}^2}{\text{densidad de fluido}}} = \sqrt{\frac{E_B}{\rho}} \quad (20)$$

Para tuberías deformables, la expresión toma la forma

$$c = \sqrt{\frac{E_B}{\rho[1 + (E_B/E)(d/t)]}} \quad (21)$$

donde  $E$  = módulo de elasticidad de la pared de la tubería, kg/m<sup>2</sup>

$d$  = diámetro de la tubería en cm

$t$  = espesor de la pared de la tubería en cm.

## VELOCIDADES SUPERSÓNICAS

A velocidades supersónicas cambia totalmente la naturaleza del flujo. El coeficiente de resistencia está relacionado con el número de Mach  $N_M$  (véase Diagrama  $H$ ), ya que la viscosidad tiene una influencia muy pequeña sobre la resistencia. La perturbación producida en la presión forma un cono, cuyo vértice está en la parte delantera del cuerpo u ojiva en el caso de un proyectil. El cono representa el frente de onda u *onda de choque*, y puede ser fotografiado. El ángulo del cono o *ángulo de Mach*  $\alpha$  viene dado por

$$\text{sen } \alpha = \frac{\text{celeridad}}{\text{velocidad}} = \frac{1}{V/c} = \frac{1}{N_M} \quad (22)$$

## Problemas resueltos

1. Determinar el coeficiente de corrección  $\beta$  de la cantidad de movimiento, que ha de aplicarse cuando se emplea la velocidad media  $V$  en el principio de la cantidad de movimiento, en el caso de flujo bidimensional.

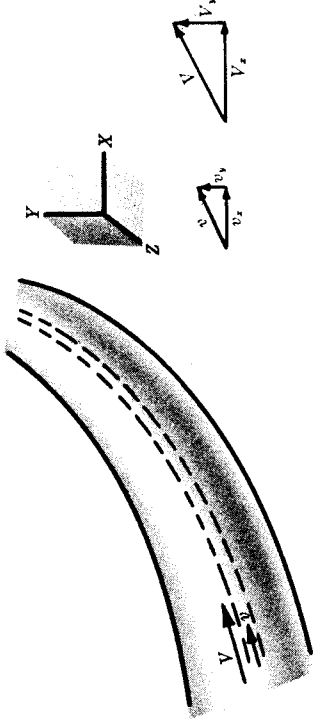


Fig. 11.1

### Solución:

El caudal en masa  $dM$  que circula a través del tubo de corriente mostrado en la Fig. 11-1 es igual a  $\rho dQ$ . La cantidad de movimiento correcta en la dirección  $X$  es

$$(\text{Cont. mov.})_x = \int dM v_x = \int \rho dQ v_x = \int \rho v_x (v dA)$$

Utilizando la velocidad media, en la sección recta, la cantidad de movimiento correcta sería

$$(\text{Cant. mov.})_x = \beta(MV_x) = \beta(\rho QV_x) = \beta\rho(AV)V_x$$

Igualando los dos valores anteriores

$$\beta = \frac{\int v \, v \, (\rho \, dA)}{\rho A V(V_x)} = \frac{1}{A} \int_A (c/V)^2 \, dA$$

ya que del diagrama vectorial de las velocidades de la figura se deduce  $v_x/V_x = v/V$ .

2. Calcular el coeficiente de corrección de la cantidad de movimiento cuando el perfil de velocidades satisface la ecuación  $v = v_{\max}[(r_0^2 - r^2)/r_0^2]$ . (Véase Capítulo 6, Problema 17, para el croquis).

**Solución:**

Del Problema 17 del Capítulo 6, la velocidad media es igual a  $\frac{1}{2}v_{\max}$ . Utilizando este valor de la velocidad media para  $V$ , se obtiene

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{1}{A} \int_A \left(\frac{v^2}{V^2}\right) dA = \frac{1}{\pi r_0^2} \int_0^{r_0} \left[ \frac{v_{\max}(r_0^2 - r^2)/r_0^2}{\frac{1}{2}v_{\max}} \right] (2\pi r \, dr) \\ &= \frac{8}{r_0^2} \left( \frac{1}{2}r_0^6 - \frac{1}{3}r_0^6 + \frac{1}{6}r_0^6 \right) = \frac{4}{3} = 1,33 \end{aligned}$$

3. Un chorro de agua de 10 cm de diámetro que se mueve hacia la derecha incide sobre una placa plana situada normalmente al eje del chorro. (a) Para una velocidad de 20,0 m/seg, ¿qué fuerza se requerirá para mantener la placa en equilibrio? (b) Comparar la presión dinámica media sobre la placa con la presión máxima (presión de estancamiento) si la placa tiene un área 20 veces mayor que la del chorro.

**Solución:**

Se toma el eje  $X$  en la dirección del eje del chorro. Así, la placa anula toda la cantidad de movimiento inicial en la dirección  $X$ . Llamando  $M$  a la masa de agua que reduce su cantidad de movimiento a cero en  $dt$  segundos y  $F_x$  la fuerza ejercida por la placa sobre el agua hacia la izquierda, se tiene:

- (a) Cantidad de movimiento inicial — impulso = cantidad de movimiento final

$$M(20,0) - F_x \, dt = M(0)$$

$$\frac{wQ}{g} \, dt(20,0) - F_x \, dt = 0$$

$$\text{y } F_x = \frac{A \quad V \quad V}{9,8} = \frac{1000[(\pi/4)(0,10)^2](20,0) \times 20,0}{9,8} = 320 \text{ kg (hacia la izquierda para mantener el equilibrio).}$$

No existe componente según la dirección  $Y$  de la fuerza en este problema, ya que las dos componentes, según esta dirección, en la placa se compensan una con otra. Se observa que también se va  $dt$ , por lo que hubiera podido escogerse igual a 1 segundo.

Es fácil ver que esta expresión del impulso-cantidad de movimiento puede ordenarse en la forma

$$F = MV = \frac{wQ}{g} V = \frac{w}{g} (AV)V = \rho AV^2 \quad (\text{kg}) \quad (1)$$

- (b) Para obtener la presión media se divide la fuerza dinámica total por el área sobre la que actúa.

$$\text{Presión media} = \frac{\text{fuerza}}{\text{área}} = \frac{\rho AV^2}{20A} = \frac{\rho V^2}{20} = \frac{w}{10} \left( \frac{V^2}{2g} \right) \quad (\text{kg/m}^2)$$

De los Problemas 1 y 5 del Capítulo 9, la presión de estancamiento =  $p_s = w(V^2/2g)$  (kg/m<sup>2</sup>).

Por tanto, la presión media es 1/10 de la presión de estancamiento, en este caso.

4. Una placa curvada desvía un ángulo de 45° un chorro de agua de 10 cm de diámetro. Para una velocidad del chorro de 40 m/seg, dirigida hacia la derecha, calcular el valor de las componentes de la fuerza desarrollada contra la placa curvada (se supone que no existe rozamiento).

**Solución:**

Las componentes se elegirán en la dirección inicial del chorro y en la dirección perpendicular a la anterior. El agua cambia su cantidad de movimiento por la acción ejercida por la fuerza que produce la placa sobre el chorro.



- (a) Para la dirección  $X$ , tomando el signo  $+$  hacia la derecha y suponiendo  $F_x$  positiva,

Cantidad de movimiento inicial  $+$  impulso  $=$  cantidad de movimiento final.

$$MV_{x_1} + F_x dt = MV_{x_2}$$

$$\frac{wQ dt}{g} V_{x_1} + F_x dt = \frac{wQ dt}{g} V_{x_2}$$

Ordenando, y al observar que  $V_{x_2} = +V_{x_1} \cos 45^\circ$ , se obtiene

$$F_x = \frac{1000[(\pi/4)(0,10)^2](40)}{9,8} (40 \times 0,707 - 40) = -375 \text{ kg}$$

donde el signo menos indica que  $F_x$  se dirige hacia la izquierda (se supuso dirigida hacia la derecha). Si  $F_x$  se hubiera supuesto dirigida hacia la izquierda se hubiera obtenido la solución  $+375$ , indicando el signo que la hipótesis había sido la correcta.

La acción del agua sobre la placa es igual y opuesta a la ejercida por la placa sobre el agua. De aquí, componente  $X$  sobre la placa  $= 375 \text{ kg}$  y dirigida hacia la derecha.

- (b) Para la dirección  $Y$ , tomando *hacia arriba* el sentido positivo,

$$MV_{y_1} + F_y dt = MV_{y_2}$$

$$0 + F_y dt = \frac{1000(0,0079)(40)dt}{9,8} (0,707 \times 40)$$

y  $F_y = +906 \text{ kg}$  dirigida hacia arriba y actuando sobre el agua. Por tanto, la componente  $Y$  sobre la placa  $= 906 \text{ kg}$  y dirigida hacia abajo.

5. La fuerza ejercida por un chorro de agua de 2 cm de diámetro sobre una placa plana, mantenida normalmente al eje del chorro, es de 70 kg. ¿Cuál es el caudal en l/seg?

**Solución:**

De la ecuación (1) del Problema 3,

$$F_x = \frac{1000QV}{9,8} = \rho AV^2$$

$$70 = \frac{1000[(\pi/4)(0,02)^2]V^2}{9,8} \text{ y } V = 46,8 \text{ m/seg.}$$

De aquí,  $Q = AV = [(\pi/4)(0,02)^2](46,8)10^3 = 14,7 \text{ l/seg.}$

6. Si la placa del Problema 3 se estuviera moviendo hacia la derecha a una velocidad de 10,0 m/seg, ¿qué fuerza ejercería el chorro sobre la placa?

**Solución:**

Utilizando  $t = 1$  segundo,  $MV_{x_1}$  inicial  $+ F_x(1) = MV_{x_2}$  final.

En este caso, la masa de agua que, por unidad de tiempo, está cambiando su cantidad de movimiento no es igual a la que lo hace en el caso de placa en reposo. En el caso de placa en reposo, en un segundo, una masa de agua de

$$(w/g)(\text{volumen}) = (w/g)(A \times 20,0)$$

cambia su cantidad de movimiento. Para la placa moviéndose, en un segundo la masa que incide contra la placa es

$$M = (w/g)[A(20,0 - 10,0)]$$

donde  $(20,0 - 10,0)$  es la velocidad relativa del agua respecto de la placa.

$$F_x = \frac{1000[(\pi/4)(0,10)^2](20,0 - 10,0)}{9,8} (10,0 - 20,0)$$

De aquí,

y  $F_x =$  fuerza de la placa sobre el agua  $= -80 \text{ kg}$  dirigida hacia la izquierda. Por tanto, la fuerza del agua sobre la placa será de 80 kg dirigida hacia la derecha.

Si la placa se hubiera movido hacia la izquierda a una velocidad de 10,0 m/seg. la masa de agua, que en un segundo cambia su cantidad de movimiento, sería mayor. El valor de  $V_x$  es ahora igual a  $-10,0$  m/seg. El módulo de la fuerza sería

$$F_x = \frac{1000(0,0079)[20,0 - (-10,0)]}{9,8}(-10,0 - 20,0) = -725 \text{ kg dirigida hacia la izquierda y que actúa sobre el agua.}$$

7. El álabe fijo mostrado en la Fig. 11-2 divide el chorro de forma que salen en cada una de las direcciones 30 l/seg. Para una velocidad inicial de 15,0 m/seg, determinar los valores de las componentes en las direcciones  $X$  e  $Y$  de la fuerza necesaria para mantener el álabe en equilibrio (suponer que no existe fricción).

**Solución:**

(a) En la dirección  $X$ , tomando  $t = 1$  segundo,

$$MV_{x_1} - F_x(1) = \frac{1}{2}MV_{x_2} + \frac{1}{2}MV_{x_2}$$

$$\frac{1000(30 \times 10^{-3})}{9,8} - F_x = \frac{1000}{9,8} \left( \frac{30 \times 10^{-3}}{2} \right) (0 + 7,5)$$

$$\text{y } F_x = +32,4 - 11,5 = +20,9 \text{ kg dirigida hacia la izquierda.}$$

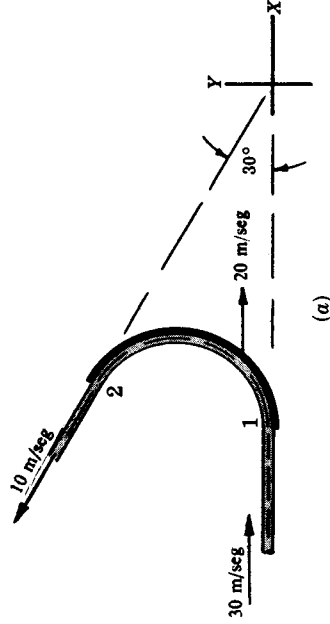
(b) En la dirección  $Y$ ,

$$MV_{y_1} - F_y(1) = \frac{1}{2}MV_{y_2} - \frac{1}{2}MV_{y_2}$$

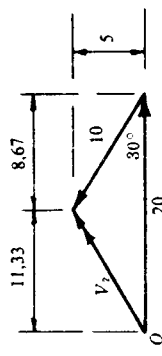
$$\frac{1000(30 \times 10^{-3})}{9,8} - F_y = \frac{1000}{9,8} \left( \frac{30 \times 10^{-3}}{2} \right) (+15,0 - 13,0)$$

$$\text{y } F_y = +32,4 - 3,1 = 29,3 \text{ kg dirigida hacia abajo.}$$

8. Un chorro de 10 cm de diámetro y a una velocidad de 30 m/seg. incide sobre un álabe móvil, que lleva una velocidad de 20 m/seg en la misma dirección del chorro. La dirección de salida del álabe forma un ángulo de  $150^\circ$  con la de entrada. Suponiendo que no existe rozamiento, calcular las componentes en las direcciones  $X$  e  $Y$  de la fuerza que ejerce el agua sobre el álabe. [Véase Fig. 11-3(a).]



(a)



(b)

**Solución:**

Fig. 11-3

La velocidad relativa  $V_{x_1} = 30 - 20 = 10$  m/seg hacia la derecha.

La velocidad del agua en 2 =  $V_{\text{agua/álabe}} \leftrightarrow V'_{\text{álabe}}$  [véase Fig. 11-3(b)] de la cual  $V'_{2x} = 11,33$  m/seg hacia la derecha y  $V'_{2y} = 5,00$  m/seg hacia arriba.

Se aplica ahora el principio del impulso-cantidad de movimiento en la dirección  $X$ .

$$(a) \quad (\text{Inicial})MV_x - F_x(1) = (\text{final})MV_x$$

$$M(30) - F_x = M(+11,33)$$

$$y \quad F_x = \frac{1000}{9,8} \left[ \frac{\pi}{4} (0,10)^2 \times 10 \right] (30 - 11,33) = 149,5 \text{ kg hacia la izquierda y actuando sobre el agua.}$$

$$(b) \quad (\text{Inicial})MV_y - F_y(1) = (\text{final})MV_y$$

$$M(0) - F_y = M(+5)$$

$$y \quad F_y = -\frac{1000}{9,8} \left[ \frac{\pi}{4} (0,10)^2 \times 10 \right] (0 - 5) = -40,0 \text{ kg hacia arriba y actuando sobre el agua.}$$

Las componentes de la fuerza ejercida por el agua sobre el álabe son 149,5 kg hacia la derecha y 40,0 kg hacia abajo.

9. Si en el Problema 8 el rozamiento reduce la velocidad del agua respecto del álabe de 10,0 m/seg a 9,0 m/seg, (a) ¿cuáles serán las componentes de la fuerza ejercida por el álabe sobre el agua? y (b) ¿cuál será la velocidad final absoluta del agua?

**Solución:**

Las componentes de la velocidad absoluta en (2) se determinarán resolviendo un triángulo análogo al de la Fig. 11-3(b) del Problema 8, utilizando un vector horizontal igual a 20,0 y otro igual a 9,0 dirigido hacia la izquierda y hacia arriba formando un ángulo de  $30^\circ$  con el anterior. Así,

$$V_{2x} = 12,2 \text{ m/seg hacia la derecha} \quad y \quad V_{2y} = 4,5 \text{ m/seg hacia arriba}$$

$$(a) \quad \text{Por tanto, } F_x = \frac{1000}{9,8} \left[ \frac{\pi}{4} (0,10)^2 \times 10 \right] (30,0 - 12,2) = 142,5 \text{ kg hacia la izquierda y actuando sobre el agua.}$$

$$F_y = \frac{1000}{9,8} \left[ \frac{\pi}{4} (0,10)^2 \times 10 \right] (0 - 4,5) = -36,0 \text{ kg hacia arriba y actuando sobre el agua.}$$

- (b) A partir de las componentes dadas antes, la velocidad absoluta con que el agua abandona el álabe será

$$V_2 = \sqrt{(12,2)^2 + (4,5)^2} = 13,0 \text{ m/seg hacia arriba y hacia la derecha formando un ángulo con la horizontal} \\ \theta_x = \arctan (4,5/12,2) = 20,2^\circ.$$

10. Para una velocidad dada de un chorro, determinar las condiciones que producirán un trabajo (o potencia) máximo sobre una serie de álabes móviles (despreciando el rozamiento a lo largo de los álabes).

**Solución:**

Se considera en primer lugar la velocidad de los álabes que proporciona una potencia máxima. Con referencia a la Fig. 11-4, se va a obtener una expresión que dé la potencia desarrollada en la dirección  $X$ , suponiendo que los álabes se mueven a lo largo del eje  $X$ . Como el chorro completo incide sobre uno u otro álabe de los diversos que forman la serie, la masa total que está fluyendo es la que cambia su cantidad de movimiento, es decir,  $M = (w/g)AV$ .

Potencia = trabajo por segundo = fuerza  $\times$  distancia recorrida en un segundo en la dirección de la fuerza.

- (1) Se determina ahora la fuerza aplicando el principio de la cantidad de movimiento. La velocidad absoluta final en la dirección  $X$  es

$$V'_x = v + (V - v) \cos \theta_x$$

y cantidad de movimiento inicial - impulso = cantidad de movimiento final

$$MV - F_x(1) = M[v + (V - v) \cos \theta_x]$$

$$F_x = (wAV/g)[(V - v)(1 - \cos \theta_x)]$$

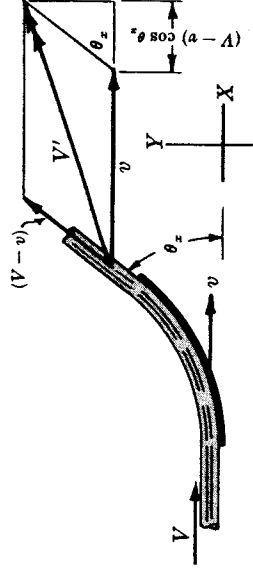


Fig. 11-4

Entonces,

$$\text{Potencia } P = (wAV/g)[(V - v)(1 - \cos \theta_x)]v \quad (1)$$

Como  $(V - v)v$  es la variable que debe tomar un valor máximo para la potencia máxima, al igualar su primera derivada a cero se obtiene

$$dP/dv = (wAV/g)(1 - \cos \theta_x)(V - 2v) = 0$$

De donde  $v = V/2$ , es decir, los álabes deben moverse a una velocidad igual a la mitad de la velocidad del chorro.

(2) Por simple inspección de la fórmula (1) anterior se ve que para unos valores dados de  $V$  y  $v$ , la máxima potencia se obtiene cuando  $\theta_x = 180^\circ$ . Como, por lo general, este ángulo no puede conseguirse en la práctica, un ángulo alrededor de  $170^\circ$  es el adecuado. La reducción de potencia es pequeña en tanto por ciento.

(3) En la dirección  $Y$ , la fuerza no compensada se equilibra utilizando álabes o cazoletas cuspidales, que desvían la mitad del caudal de agua del chorro a cada uno de los lados del eje  $Y$ .

**11.** (a) Con referencia a la Fig. 11-5, ¿con qué ángulo debe incidir un chorro de agua, que se mueve a una velocidad de 15,0 m/seg, sobre una serie de álabes, que se mueven a una velocidad de 6,0 m/seg, para que el agua entre tangencialmente en los álabes, es decir, no haya choque? (b) ¿Qué potencia se desarrollará si el caudal es de 125 l/seg? (c) ¿Cuál es el rendimiento de los álabes?

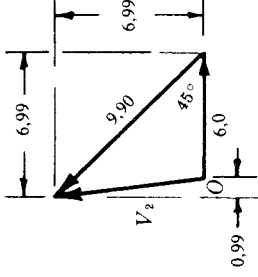
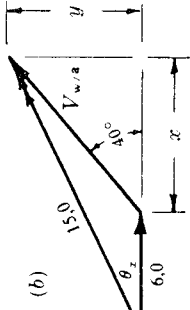
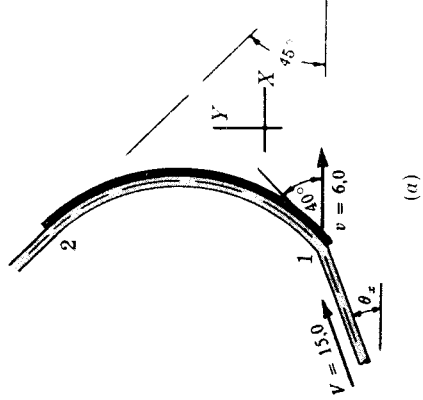


Fig. 11-5

**Solución:**

(a) Velocidad del agua = velocidad del agua/álabes  $\leftrightarrow$  velocidad de los álabes

$$15,0 \text{ en } \angle \theta_x = ? \text{ en } 40^\circ \leftrightarrow 6,0 \rightarrow$$

Del diagrama vectorial, Fig. 11-5(b),  $15 \cos \theta_x = 6,0 + x$ ,  $15 \sin \theta_x = y$  y  $\tan 40^\circ = y/x = 0,8391$ . Resolviendo estas ecuaciones,  $\theta_x = 25^\circ 5'$ .

(b) De la Fig. 11-5(b) puede determinarse la velocidad del agua respecto de los álabes,

$$y = 15 \sin \theta_x = 15 \sin 25^\circ 5' = 6,36 \text{ m/seg} \quad y \quad V_{\text{ag.al}} = y/(\sin 40^\circ) = 9,90 \text{ m/seg.}$$

Además,  $V_{x2}$  (absoluta) = 0,99 m/seg, hacia la izquierda, como se deduce de la Fig. 11-5(c). Por tanto,

$$\text{fuerza } F_x = \frac{M}{1000 \times 0,125} \frac{V_1 \cos \theta_x}{9,8} [15 \times 0,906 - (-0,99)] = 161 \text{ kg y la potencia } E_x = 161 \times 6 = 966 \text{ kgm/seg.}$$

$$(c) \text{ Rendimiento} = \frac{966}{\frac{1}{2} M (15)^2} = \frac{966}{1435} = 67,3 \%$$

12. Una tubería de 60 cm de diámetro, que transporta 900 l/seg de un aceite ( $Dr = 0,85$ ), tiene un codo de  $90^\circ$  en un plano horizontal. La pérdida de carga en el codo es de 1,10 m de aceite y la presión a la entrada de 3,00 kg/cm<sup>2</sup>. Determinar la fuerza resultante ejercida por el aceite sobre el codo.

**Solución:**

Con referencia a la Fig. 11-6, el diagrama del cuerpo libre, que se muestra, pone de manifiesto las fuerzas estáticas y dinámicas que actúan sobre la masa de aceite que ocupa el codo. Dichas fuerzas se calculan como sigue:

$$(a) \quad P_1 = p_1 A = 3,00 \times \frac{1}{4}\pi(60)^2 = 8480 \text{ kg.}$$

$$(b) \quad P_2 = p_2 A, \text{ donde } p_2 = p_1 - \text{pérdida en kg/cm}^2, \text{ como se deduce a partir de la ecuación de Bernoulli, ya que } z_1 = z_2 \text{ y } V_1 = V_2. \text{ Por tanto, } P_2 = (3,00 - 0,85 \times 1000 \times 1,10/10^4) \times \frac{1}{4}\pi(60)^2 = 8220 \text{ kg.}$$

$$(c) \quad \text{Mediante el principio del impulso-cantidad de movimiento y sabiendo que } V_1 = V_2 = Q/A = 3,2 \text{ m/seg,}$$

$$MV_{x_1} + \Sigma (\text{fuerzas en la dirección } X) \times 1 = MV_{x_2}$$

$$8480 - F_x = (0,85 \times 1000 \times 0,9000/9,8)(0 - 3,2) = -250 \text{ kg}$$

$$\text{y} \quad F_x = 8730 \text{ kg hacia la izquierda y sobre el aceite}$$

$$(d) \quad \text{Análogamente, para } t = 1 \text{ segundo,}$$

$$MV_{y_1} + \Sigma (\text{fuerzas en la dirección } Y) \times 1 = MV_{y_2}$$

$$F_y - 8220 = (0,85 \times 1000 \times 0,9000/9,8)(3,2 - 0) = +250 \text{ kg}$$

$$\text{y} \quad F_y = +8270 \text{ kg hacia abajo y sobre el aceite.}$$

Sobre el codo la fuerza resultante  $R$  actúa hacia la derecha y hacia abajo, y su valor es igual a

$$R = \sqrt{(8730)^2 + (8270)^2} = 12.025 \text{ kg con } \theta_x = \arctg (8270/8730) = 43,4^\circ$$

13. La tubería de 60 cm del Problema 12 está conectada a una tubería de 30 cm mediante un cono *reductor* normal. Para el mismo caudal de 900 l/seg de aceite, y una presión de 2,80 kg/cm<sup>2</sup> en la sección 1 (Fig. 11-7), ¿cuál es la fuerza ejercida por el aceite sobre el cono reductor si se desprecian las pérdidas de carga en el mismo?

**Solución:**

Como  $V_1 = 3,2 \text{ m/seg}$ ,  $V_2 = (2/1)^2 \times 3,2 = 12,8 \text{ m/seg}$ . Además, al aplicar la ecuación de Bernoulli entre las secciones 1 y 2, a la entrada y salida del reductor, se obtiene

$$\left(\frac{p_1}{w} + \frac{(3,2)^2}{2g} + 0\right) - (\text{pérdidas desp.}) = \left(\frac{p_2}{w} + \frac{(12,8)^2}{2g} + 0\right)$$

$$\text{Despejando, } \frac{p^2}{w} = \frac{2,80 \times 10^4}{0,85 \times 1000} + \frac{10,2}{2g} - \frac{163,8}{2g} = 25,1 \text{ m de aceite} \quad \text{y} \quad p'_2 = 2,13 \text{ kg/cm}^2.$$

En la Fig. 11-7 se representan las fuerzas que actúan sobre la masa de aceite que ocupa el reductor.

$$P_1 = p_1 A_1 = 2,80 \times \frac{1}{4}\pi(60)^2 = 7920 \text{ kg (hacia la derecha)}$$

$$P_2 = p_2 A_2 = 2,13 \times \frac{1}{4}\pi(30)^2 = 1510 \text{ kg (hacia la izquierda)}$$

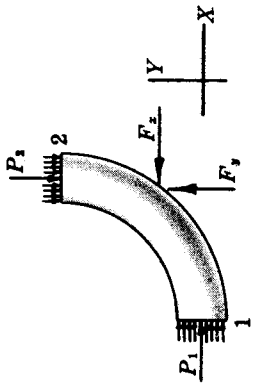


Fig. 11-6

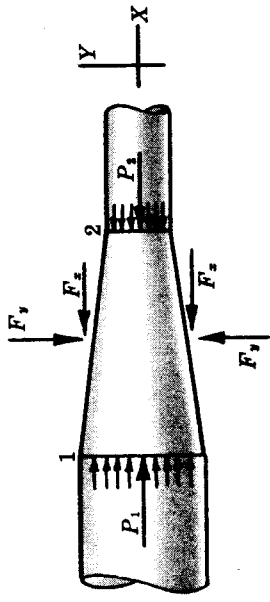


Fig. 11-7

Varia la cantidad de movimiento del aceite en la dirección  $X$ . Por tanto,

$$MV_{x_1} + \Sigma (\text{fuerzas en la dirección } X) \times 1 = MV_{x_2}$$

$$(7920 - 1510 - F_x)1 = (0,85 \times 1000 \times 0,900/9,8)(12,8 - 3,2)$$

y  $F_x = 5660$  kg, actuando hacia la izquierda sobre el aceite.

Las fuerzas en la dirección  $Y$  se equilibran unas con otras y  $F_y = 0$ .

De aquí, la fuerza ejercida por el aceite sobre el cono reductor es de 5660 kg actuando hacia la derecha.

14. Por un codo reductor de  $45^\circ$ , de 60 cm de diámetro en la sección de aguas arriba y 30 cm en la de aguas abajo, circulan 450 l/seg de agua con una presión de  $1,50 \text{ kg/cm}^2$  en la sección 1 (Fig. 11-8). Despreciando cualquier pérdida en el codo, calcular la fuerza ejercida por el agua sobre el codo reductor.

**Solución:**

$$V_1 = 0,450/A_1 = 1,60 \text{ m/seg}$$

$$V_2 = 6,40 \text{ m/seg}$$

y

La ecuación de Bernoulli, entre las secciones 1 y 2,

da

$$\left( \frac{1,50 \times 10^4}{1000} + \frac{2,56}{2g} + 0 \right) = \left( \frac{p_2}{w} + \frac{40,96}{2g} + 0 \right)$$

de la cual,  $p_2/w = 13,0$  m y  $p_2 = 1,30 \text{ kg/cm}^2$ .

En la Fig. 11-8 se muestran las fuerzas estáticas y dinámicas que actúan sobre la masa de agua.

$$P_1 = p_1 A_1 = 1,50 \times \frac{1}{4}\pi(60)^2 = 4240 \text{ kg}$$

$$P_2 = p_2 A_2 = 1,30 \times \frac{1}{4}\pi(30)^2 = 920 \text{ kg}$$

$$P_{2x} = P_2 = 920 \times 0,707 = 650 \text{ kg}$$

En la dirección  $X$ ,

$$MV_{x_1} + \Sigma (\text{fuerzas en la dirección } X) \times 1 = MV_{x_2}$$

$$(4240 - 650 - F_x)1 = (1000 \times 0,450/9,8)(6,40 \times 0,707 - 1,60)$$

y  $F_x = 3455$  kg hacia la izquierda.

En la dirección  $Y$ ,

$$(+F_y - 650)1 = (1000 \times 0,450/9,8)(6,40 \times 0,707 - 0)$$

y  $F_y = 860$  kg hacia arriba.

La fuerza ejercida por el agua sobre el codo reductor es  $F = \sqrt{(3455)^2 + (860)^2} = 3560$  kg dirigida hacia la derecha y hacia abajo, siendo el ángulo que forma con la horizontal  $\theta_x = \arctg (860/3455) = 13^\circ 59'$ .

15. Con referencia a la Fig. 11-9, un chorro de agua de 5 cm de diámetro choca con una compuerta cuadrada de 1,20 m de lado y que forma con la dirección del chorro un ángulo de  $30^\circ$ . La velocidad del chorro es de 20 m/seg e incide en el centro de gravedad de la compuerta. Despreciando el rozamiento, ¿qué fuerza normal a la compuerta habrá que aplicar en el extremo opuesto a la bisagra para mantenerla en equilibrio?

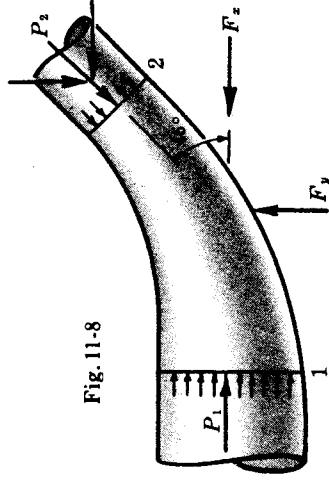


Fig. 11-8

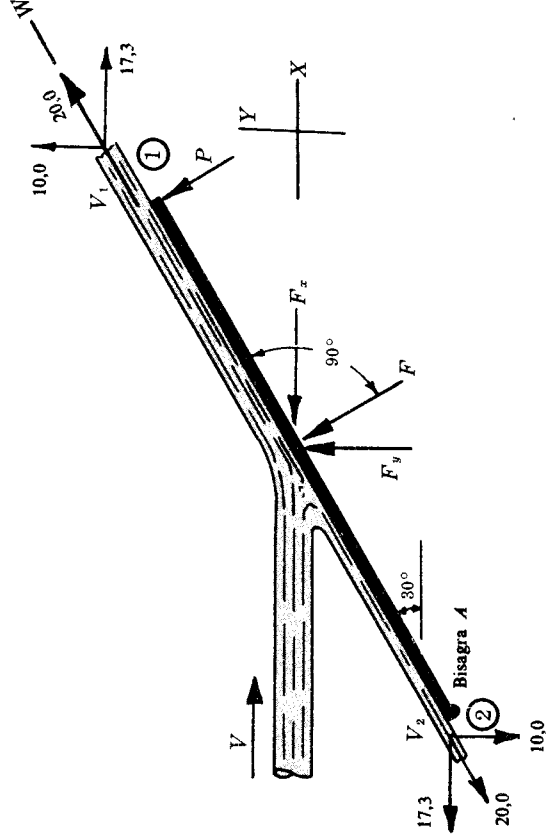


Fig. 11-9

**Solución:**

La fuerza ejercida por la compuerta sobre el agua será perpendicular a la compuerta, por no existir rozamiento. De aquí, por no actuar ninguna fuerza en la dirección  $W$ , mostrada en la figura, no habrá variación de la cantidad de movimiento en esta dirección. Por tanto, utilizando las componentes en la dirección  $W$ ,

Cantidad de movimiento inicial  $\pm 0$  = cantidad de movimiento final

$$+ M(V \cos 30^\circ) = + M_1 V_1 - M_2 V_2$$

$$(w/g)(A_{\text{chor}} V)(V \cos 30^\circ) = (w/g)(A_1 V_1) V_1 - (w/g)(A_2 V_2) V_2$$

Pero  $V = V_1 = V_2$  (por despreciarse el rozamiento). Entonces,

$$A_{\text{chor}} \cos 30^\circ = A_1 - A_2 \text{ y, por la ecuación de continuidad, } A_{\text{chor}} = A_1 + A_2$$

Resolviendo este sistema,

$$A_1 = A_{\text{chor}}(1 + \cos 30^\circ)/2 = A_{\text{chor}} \times 0,933 \quad \text{y} \quad A_2 = A_{\text{chor}}(1 - \cos 30^\circ)/2 = A_{\text{chor}} \times 0,067$$

La corriente de agua se divide como se ha indicado y la ecuación de la cantidad de movimiento en la dirección  $X$  da

$$\left[ \frac{1000}{9,8} \left( -\pi \right) (0,05)^2 20 \right] 20 - \dot{F}_x(1) = \left[ \frac{1000}{9,8} \left( -\pi \right) (0,05)^2 0,933(20) \right] 17,3 + \left[ \frac{1000}{9,8} \left( -\pi \right) (0,05)^2 0,067(20) \right] (-17,3)$$

de donde  $F_x = 20,5 \text{ kg}$ .

Análogamente, en la dirección  $Y$ ,

$$M(0) + F_y(1) = \left[ \frac{1000}{9,8} (0,002)(0,933)20 \right] 10 + \left[ \frac{1000}{9,8} (0,002)(0,067)20 \right] (-10),$$

de donde  $F_y = 35,3 \text{ kg}$ .

Para la compuerta, como cuerpo libre,  $\Sigma M_{\text{bisagra}} = 0$  y

$$+ 20,5(0,3) + 35,3(0,6 \times 0,866) - P(1,2) = 0 \quad \text{o} \quad P = 20,4 \text{ kg}$$

16. Determinar la reacción que produce un chorro que fluye por un orificio practicado en la pared lateral del depósito que contiene el líquido.

**Solución:**

En la figura adjunta se toma como un cuerpo libre la masa de líquido  $ABCD$ . Las únicas fuerzas horizontales presentes son  $F_1$  y  $F_2$ , que producen la variación en la cantidad de movimiento del agua.

$(F_1 - F_2) \times 1 = M(V_2 - V_1)$ , donde  $V_1$  puede considerarse despreciable.

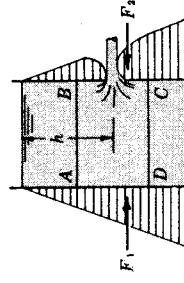


Fig. 11-10

$$\text{Reacción } F = F_1 - F_2 = \frac{wQ}{g} V_2 = \frac{wA_2 V_2}{g} V_2.$$

$$\text{Pero } A_2 = c_c A_o \quad \text{y} \quad V_2 = c_c \sqrt{2gh}.$$

$$\text{De donde } F = \frac{w(c_c A_o)^2 (2gh)}{g} = (c_c^2) w A_o (2h) \quad (\text{hacia la derecha sobre el líquido})$$

- (1) Para los valores medios  $c = 0,60$  y  $c_v = 0,98$ , la fuerza de reacción es  $F = 1,176whA_o$ . De aquí, la fuerza que actúa hacia la izquierda sobre el depósito es, aproximadamente, el 18 % mayor que la fuerza estática que actuaría sobre un tapón que cerrara justamente el orificio.
- (2) Para un flujo ideal (sin rozamiento y sin contracción),  $F = 2(whA_o)$ . Esta fuerza es igual al doble de la que actuaría sobre el tapón que cerrara el orificio.
- (3) Para el caso de una boquilla ( $c_c = 1,00$ ), la reacción es  $F = c_c^2 w A (2h)$ , donde  $h$  representa la altura de carga efectiva que da lugar al flujo.

17. Los chorros de un aparato de riego por aspersión tienen 3 cm de diámetro y salen en dirección normal al radio de 60 cm. Si la presión en las bases de las boquillas es de 3,50 kg/cm<sup>2</sup>, ¿qué fuerza debe aplicarse sobre cada uno de los brazos, a 30 cm del eje de giro, para mantener el aspersor en reposo? (Utilizar  $c_v = 0,80$  y  $c_c = 1,00$ .)

**Solución:**

La reacción producida por el chorro del aspersor puede calcularse por el principio de la cantidad de movimiento. Además, como la fuerza que produce el cambio en la cantidad de movimiento en la dirección  $X$  actúa a lo largo del eje  $X$ , no da lugar a ningún par. Interesa, por tanto, la variación de la cantidad de movimiento en la dirección  $Y$ . Pero la cantidad de movimiento inicial en la dirección  $Y$  es nula. La velocidad del chorro será

$$V_Y = c_v \sqrt{2gh} = 0,80 \sqrt{2g(35,0 + \text{altura de velocidad despreciable})} = 21,0 \text{ m/seg}$$

$$\text{Así,} \quad F_Y dt = M(V_Y) = \left[ \frac{1000}{9,8} \times \frac{1}{4} \pi (0,03)^2 \times 21,0 \, dt \right] (-21,0)$$

de donde  $F_Y = -31,8$  kg dirigida hacia abajo y actuando sobre el agua. De aquí, la fuerza que el chorro ejerce sobre el aspersor es de +31,8 kg y dirigida hacia arriba. Finalmente,

$$\Sigma M_o = 0, \quad F(0,3) - 0,6(31,8) = 0, \quad F = 63,6 \text{ kg para el equilibrio}$$

18. Desarrollar las ecuaciones básicas que dan el empuje en los dispositivos de propulsión.

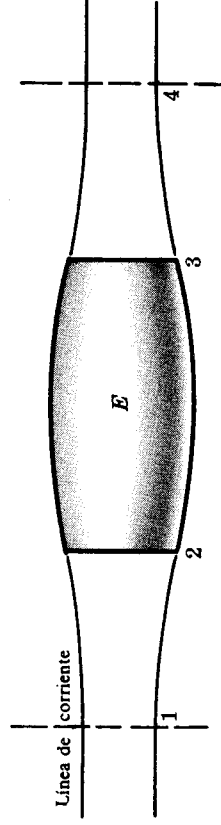


Fig. 11-12

**Solución:**

En la Fig. 11-12 se muestra un motor a reacción  $E$ , que utiliza  $W$  kg de aire por segundo. En la sección 1, la velocidad  $V_1$  del aire que entra en el motor es igual a la velocidad de vuelo. También se considera que el aire entra a la presión atmosférica (a la que no tienen lugar ondas de choque). En el motor  $E$  el aire es comprimido y calentado por combustión. El aire abandona la tobera en la sección 3 a una gran velocidad, con lo que su cantidad de movimiento ha aumentado notablemente.



En la mayoría de los motores a reacción, el peso por segundo de aire que sale del motor es mayor que el que entra, debido a la adición del combustible. Este aumento viene a ser del 2 %. El peso de aire a la salida se mide, por lo general, en la sección 3.

El empuje se evalúa en función de la variación en la cantidad de movimiento como sigue:

$$\text{Empuje } F = \frac{W_{\text{sal}} V_4}{g} - \frac{W_1 V_1}{g} \quad (A)$$

En los casos en que la presión en la sección 3 es mayor que la atmosférica se obtiene todavía una aceleración adicional del gas. La fuerza adicional es igual al producto de la diferencia de presiones por el área de la sección 3. Así, para la variación de la cantidad de movimiento entre las secciones 1 y 3, se obtiene

$$F = \frac{W_{\text{sal}} V_3}{g} + A_3(p_3 - p_4) - \frac{W_1 V_1}{g} \quad (B)$$

Si se quiere determinar la velocidad efectiva de eyección, se resuelve el sistema de ecuaciones simultáneas (A) y (B),

$$V_4 = V_3 + \frac{g A_3}{W_3}(p_3 - p_4) \quad (C)$$

Se observará que si  $p_3 = p_4$ ,  $V_4 = V_3$ .

El término  $W_1 V_1/g$  se conoce con el nombre de empuje negativo o resistencia de atraque. El empuje bruto (producido por la tobera) es  $W_3 V_3/g$  en la ecuación (A) y  $W_3 V_3/g + A_3(p_3 - p_4)$  en la ecuación (B).

Para un motor cohete el empuje se calcula mediante la ecuación (A) por ser  $V_1 = 0$  en estos dispositivos.

19. En el laboratorio se ensaya un motor a chorro. El motor consume 23,0 kg/seg de aire y 0,20 kg/seg de combustible. Si la velocidad de salida de los gases es de 450 m/seg, ¿qué valor tiene el empuje?
- Solución:**

Mediante la fórmula (A) del Problema 18, empuje  $F = (23,2 \times 450 - 23 \times 0)/9,8 = 1060$  kg.

20. Un motor a chorro funciona a 180 m/seg y consume un caudal en peso de aire de 23,0 kg/seg. ¿A qué velocidad ha de descargar el aire para que el empuje sea igual a 680 kg?

**Solución:**

Empuje  $F = 680 = (23/9,8)(V_{\text{sal}} - 180)$ , de donde  $V_{\text{sal}} = 470$  m/seg.

21. En el laboratorio se ensaya un motor turborreactor bajo unas condiciones semejantes a las que reinan en cierta altitud, donde la presión atmosférica es de 3830 kg/m<sup>2</sup> (ab), la temperatura  $T = 238,5^\circ \text{K}$  y el peso específico  $w = 0,549 \text{ kg/m}^3$ . Si el área de la sección de salida del motor es de 1400 cm<sup>2</sup> y la presión de salida la atmosférica, ¿cuál es el número de Mach si el empuje bruto es de 670 kg? (Utilizar  $k = 1,33$ .)

**Solución:**

Como en la ecuación (B) del Problema 18,  $p_3 = p_4$  y  $V_1 = 0$ ,

$$F = W_3 V_3/g = (w A_3 V_3) V_3/g, \quad 670 = 0,549(0,140) V_3^2/g, \quad V_3 = 292 \text{ m/seg}$$

$$\text{El número de Mach } N_M = V_3/c = V_3/\sqrt{kgRT} = 292/\sqrt{1,33(9,8)(29,3)(238,5)} = 0,97$$

22. En el Problema 21, ¿cuál será el empuje bruto si la presión de salida fuera de 0,70 kg/cm<sup>2</sup> (ab) y el número de Mach igual a 1,00? (Utilizar  $k = 1,33$ .)

**Solución:**

Con el fin de calcular la velocidad de salida para las nuevas condiciones en la salida, se calcula la temperatura en dicha sección a partir de

$$T_s/238,5 = (0,70 \times 10^4/3830)^{(k-1)/k}, \text{ de donde } T_s = 277^\circ \text{ K.}$$

$$\text{Entonces, } V_s = N_M c = N_M \sqrt{kgRT} = 1,00 \sqrt{1,3(39,8)(29,3)(277)} = 325 \text{ m/seg.}$$

Además, se calculará el peso específico en la salida a partir de

$$(w_1/w_2)^k = p_1/p_2, \quad (w_1/0,549)^{1,33} = 0,70 \times 10^4/3830, \quad w_e = 0,864 \text{ kg/m}^3$$

Mediante la ecuación (B) del Problema 18,

$$F = 0,864(0,140)(325)^2/9,8 + 0,140(7000 - 3830) - 0 = 1746 \text{ kg.}$$

23. Un motor cohete quema su propulsor a razón de 6,90 kg/seg. Los gases, productos de la combustión, abandonan el cohete a la presión atmosférica y a una velocidad relativa de 980 m/seg. La tobera de empuje tiene un área de salida de 320 m<sup>2</sup> y el peso bruto del cohete es de 230 kg. En un instante determinado, el motor cohete desarrolla una potencia de 2500 CV. ¿Cuál es la velocidad del cohete?

**Solución:**

En un motor cohete no entra aire del exterior de forma que los términos de la sección 1 en la ecuación (B) del Problema 18 se anulan. Además, como la presión de salida es la atmosférica,  $p_3 = p_4$ . Así, el empuje

$$F_T = (W_s/g)V_s = (6,90/9,8)(980) = 690 \text{ kg}$$

$$\text{y como } 2500 \text{ CV} = F_T V_{\text{cohete}}/75, \quad V_{\text{cohete}} = 272 \text{ m/seg}$$

24. Suponiendo que la resistencia es función de las magnitudes físicas: densidad, viscosidad, elasticidad y velocidad del fluido, y de un área característica, demostrar que la resistencia es función de los números de Mach y de Reynolds (véase Capítulo 5, Problemas 9 y 16).

**Solución:**

Como ya quedó establecido en el Capítulo 5, un estudio mediante el análisis dimensional conducirá a la relación deseada, como se indica a continuación.

$$F_D = f_1(\rho, \mu, E, V, A)$$

$$\text{o} \quad F_D = C \rho^a \mu^b E^c V^d L^{2e}$$

$$\text{Entonces, dimensionalmente, } F^1 L^0 T^0 = (F^a T^{2a} L^{-4a}) (F^b T^b L^{-2b}) (F^c L^{-2c}) (L^d T^{-d}) L^{2e}$$

$$\text{y} \quad 1 = a + b + c, \quad 0 = -4a - 2b - 2c + d + 2e, \quad 0 = 2a + b - d$$

Resolviendo el sistema en función de  $b$  y  $c$  se obtiene

$$a = 1 - b - c, \quad d = 2 - b - 2c, \quad e = 1 - b/2$$

$$\text{Sustituyendo, } F_D = C \rho^{1-b-c} \mu^b E^c V^{2-b-2c} L^{2-b}$$

Expresando esta ecuación en la forma usual se llega a

$$F = CA \rho V^2 \left( \frac{\mu}{L \rho V} \right)^b \left( \frac{E}{\rho V^2} \right)^c$$

$$\text{o} \quad F = A \rho V^2 f_2(R_E, N_M)$$

Esta ecuación pone de manifiesto que el coeficiente de resistencia de objetos sumergidos en corrientes fluidas de forma geométrica dada y orientados de forma definida respecto de la corriente, dependen únicamente de los números de Reynolds y de Mach.

En el caso de fluidos incompresibles el número de Reynolds es el predominante, y la influencia del número de Mach es pequeña o despreciable; por tanto, los coeficientes de resistencia son función exclusiva del número de Reynolds  $R_E$ . (Véanse Diagramas  $F$  y  $G$  del Apéndice.) En realidad, para valores pequeños de  $N_M$  el fluido puede considerarse incompresible en lo que se refiere al coeficiente de resistencia.

Cuando el número de Mach  $N_M$  es igual o mayor que 1.0 (con velocidades del fluido iguales o mayores que la velocidad de propagación del sonido) el coeficiente de resistencia es solo función de  $N_M$ . (Véase Diagrama del Apéndice.) No obstante, frecuentemente se presentan situaciones en que el coeficiente de resistencia depende tanto de  $R_E$  como de  $N_M$ .

Puede hacerse un estudio análogo del coeficiente de sustentación, y las conclusiones a que se han llegado son aplicables a este coeficiente de sustentación. Se sugiere el empleo del teorema de Pi de Buckingham.

25. Un viento de una velocidad de 80 km/h choca contra una pancarta de señalización de 2.0 m por 2.5 m incidiendo normalmente a su superficie. Para una lectura barométrica normal, ¿cuál es la fuerza que actúa contra la señal? ( $w = 1,200 \text{ kg/m}^3$ .)

**Solución:**

Para un chorro de fluido, de pequeña sección transversal, que incide sobre una placa en reposo de grande dimensiones, se ha visto que la fuerza ejercida por el fluido es

$$(\text{Fuerza})_x = \Delta(MV_x) = (w/g)(AV_x)V_x = \rho AV_x^2$$

La placa en reposo que se considera en este problema afecta a una gran cantidad de aire. Su cantidad de movimiento no se reduce a cero en la dirección  $X$ , como sucedía en el caso del chorro de agua. Los ensayos realizados con placas que se mueven a través de fluidos a diferentes velocidades muestran que el coeficiente de resistencia varía con la relación de longitud a anchura y que su valor es prácticamente constante por encima de números de Reynolds iguales a 1000. (Véase Diagrama F del Apéndice.) Es indiferente que el objeto se mueva a través de un fluido en reposo o sea el fluido el que se mueva alrededor del objeto en reposo; los coeficientes de resistencia y las resistencias totales son iguales en ambos casos. La velocidad relativa es la magnitud significativa.

El coeficiente ( $C_D$ ) se emplea en la siguiente ecuación:  $\text{Fuerza } F = C_D \rho A \frac{V^2}{2}$ .

Esta ecuación se escribe a veces para incluir la altura de velocidad, en la siguiente forma:

$$\text{Fuerza } F = C_D w A \frac{V^2}{2g}$$

Utilizando  $C_D = 1.20$ , obtenido en el Diagrama F,  $\text{Fuerza } F = 1.20 \left( \frac{1,200}{9.8} \right) (5) \frac{(80 \times 1000/3600)^2}{2} = 181 \text{ kg}$ .

26. Una placa plana de 1.2 m por 1.2 m se mueve a una velocidad de 6.5 m/seg en dirección normal a su plano. Determinar la resistencia que se opone al movimiento ( $a$ ) cuando se mueve a través del aire a  $20^\circ \text{C}$  y presión atmosférica normal y ( $b$ ) cuando lo hace a través de agua a  $15^\circ \text{C}$ .

**Solución:**

(a) Del Diagrama F, para longitud/anchura = 1,  $C_D = 1.16$ .

$$\text{Resistencia} = C_D \rho A \frac{V^2}{2} = 1.16 \left( \frac{1,200}{9.8} \right) (1.2 \times 1.2) \frac{(6.5)^2}{2} = 4.3 \text{ kg}.$$

$$(b) \text{ Resistencia} = C_D \rho A \frac{V^2}{2} = 1.16 (102) (1.2 \times 1.2) \frac{(6.5)^2}{2} = 3600 \text{ kg}.$$

27. Un hilo de cobre de gran longitud y 12 mm de diámetro está tensado y expuesto a un viento de 27.0 m/seg, que incide normalmente al eje del hilo. Calcular la resistencia por metro de longitud.

**Solución:**

Para aire a  $20^\circ \text{C}$  la Tabla 1 da  $\rho = 0.1224 \text{ UTM/m}^3$  y  $\nu = 1,488 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{seg}$ . Entonces,

$$R_E = \frac{V'd}{\nu} = \frac{27 \times 12 \times 10^{-3}}{1,488} \times 10^5 = 21,800$$

Del Diagrama F,  $C_D = 1.30$ . De aquí,

$$\text{Resistencia} = C_D \rho A \frac{V^2}{2} = 1.30 (0.1224) (1 \times 0.012) \frac{(27)^2}{2} = 0.696 \text{ kg por metro de longitud}$$

28. Una placa plana de 0.9 m por 1.2 m se mueve a una velocidad de 12 m/seg a través de aire en reposo, formando un ángulo de  $12^\circ$  con la horizontal. Utilizando un coeficiente de resistencia de  $C_D = 0.17$  y un coeficiente de sustentación de  $C_L = 0.72$ , determinar ( $a$ ) la fuerza resultante que ejerce el aire sobre la placa, ( $b$ ) la fuerza debida al rozamiento y ( $c$ ) la potencia, en CV, necesaria para mantener el movimiento. (Utilizar  $w = 1,200 \text{ kg/m}^3$ .)

**Solución:**

$$\begin{aligned}
 (a) \text{ Resistencia} &= C_D \left(\frac{w}{g}\right) A \frac{V^2}{2} \\
 &= 0,17 \left(\frac{1,200}{9,8}\right) (1,08) \frac{(12)^2}{2} = 1,62 \text{ kg.}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Sustentación} &= C_L \left(\frac{w}{g}\right) A \frac{V^2}{2} \\
 &= 0,72 \left(\frac{1,200}{9,8}\right) (1,08) \frac{(12)^2}{2} = 6,85 \text{ kg.}
 \end{aligned}$$

Con referencia a la Fig. 11-13, la resultante de las componentes de resistencia y sustentación será

$$R = \sqrt{(1,62)^2 + (6,85)^2} = 7,02 \text{ kg, que actúa sobre la placa formando un ángulo } \theta_x = \arctg(6,85/1,62) = 76^\circ 42' \text{ con la horizontal.}$$

- (b) La resultante puede descomponerse también en una componente normal a la placa y una tangencial o de rozamiento (dibujadas a trazos en la figura). Del triángulo vectorial,

$$\text{componente del rozamiento} = R \cos (\theta_x + 12^\circ) = (7,02)(0,0227) = 0,16 \text{ kg.}$$

- (c) Potencia (CV) = (fuerza en dirección del movimiento  $\times$  velocidad)/75 =  $(1,62 \times 12)/75 = 0,259$  CV

**29.**

Si un avión pesa 1800 kg y la superficie de sus alas es de 28 m<sup>2</sup>, ¿qué *ángulo de ataque* han de formar las alas con la horizontal a una velocidad de 160 km/h? Suponer que el coeficiente de sustentación varía linealmente de 0,35 a 0° hasta 0,80 a 6° y utilizar para el aire  $w = 1,200 \text{ kg/m}^3$ .

**Solución:**

Para el equilibrio en dirección vertical,  $\Sigma Y = 0$ . Por tanto, sustentación – peso = 0, es decir,

$$\text{Peso} = C_L w A \frac{V^2}{2g}, \quad 1800 = C_L (1,200)(28) \frac{(160 \times 1000/3600)^2}{2g}, \quad C_L = 0,53$$

Por interpolación entre 0° y 6°, ángulo de ataque = 2,4°.

**30.**

¿Qué superficie de alas se necesita para soportar un avión de 2300 kg, cuando vuela a una velocidad de 28 m/seg con un *ángulo de ataque* de 5°? Utilizar los coeficientes dados en el Problema 29.

**Solución:**

Por los datos del problema anterior, o bien de una curva,  $C_L = 0,725$  para 5°. Como en el Problema 29,

$$\text{Peso} = \text{sustentación}, \quad 2300 = 0,725(1,200/9,8)(28)^2/2, \quad A = 66,16 \text{ m}^2$$

**31.**

Un perfil de ala de 40 m<sup>2</sup> de área y con un ángulo de ataque de 6° se mueve a una velocidad de 25 m/seg. Si el coeficiente de resistencia varía linealmente de 0,040 a 4° hasta 0,120 a 14°, ¿qué potencia se requiere para mantener dicha velocidad en aire a 5° C y 0,90 kg/cm<sup>2</sup> de presión absoluta?

**Solución:**

$$w = \frac{p}{RT} = \frac{0,90 \times 10^4}{29,3(273 + 5)} = 1,105 \text{ kg/m}^3, \text{ para el aire}$$

Para un ángulo de ataque de 6°, por interpolación,  $C_D = 0,056$ .

$$\text{Resistencia} = C_D \rho A V^2/2 = 0,056(1,105/9,8)(40)(25)^2/2 = 79 \text{ kg}$$

$$\text{Potencia (CV)} = (79 \text{ kg})(25 \text{ m/seg})/75 = 26,3 \text{ CV}$$

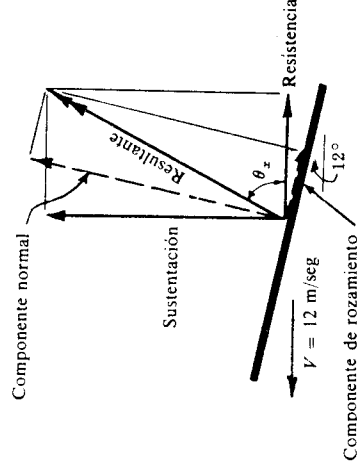


Fig. 11-13

32. En el problema precedente, para un coeficiente de sustentación de 0,70 y una cuerda de 1,50 m de longitud, determinar (a) la sustentación y (b) los números de Reynolds y Mach.

**Solución:**

$$(a) \text{ Sustentación } F_L = C_L \rho A V^2/2 = 0,70(1,105/g)(40)(25)^2/2 = 985 \text{ kg.}$$

$$(b) \text{ La longitud característica en el número de Reynolds es la longitud de la cuerda. Así,}$$

$$R_E = \frac{VL\rho}{\mu} = \frac{25 \times 1,5 \times 1,105}{(1,77 \times 10^{-6})(9,8)} = 2.386.400$$

Se recordará que la viscosidad absoluta no varía con la presión.

$$N_M = V/\sqrt{E/\rho} = V/\sqrt{kgRT} = 25/\sqrt{(1,4)(9,8)(29,3)(278)} = 0,075$$

33. Un perfil de ala de 25 m<sup>2</sup> de área se mueve a una velocidad de 25,0 m/seg. Si la potencia requerida para mantener el movimiento es de 14,0 CV, ¿cuál es el ángulo de ataque empleado si las variaciones del coeficiente de resistencia son las dadas en el Problema 31? Utilizar, como en el Problema 31,  $w = 1,105 \text{ kg/m}^3$ .

**Solución:**

$$14,0 \text{ CV} = (\text{fuerza})(25,0 \text{ m/seg})/75, \quad \text{fuerza} = 42,0 \text{ kg}$$

$$\text{Fuerza} = C_D \rho A V^2/2, \quad 42,0 = C_D(1,105/9,8)(25)(25)^2/2, \quad C_D = 0,0477$$

Mediante los datos que relacionan el ángulo de ataque con  $C_D$ , por interpolación, se obtiene como ángulo de ataque 5,0°.

34. Un furgón tiene 50 m<sup>2</sup> de área de uno de sus lados. Calcular la fuerza resultante sobre dicho lado del furgón cuando el viento está soplando a una velocidad de 16 km/h normal al área lateral del furgón (a) si el furgón está en reposo y (b) cuando se mueve a una velocidad de 45 km/h normal a la dirección del viento. En (a) utilizar  $C_D = 1,30$ , y en (b)  $C_D = 0,25$  y  $C_L = 0,60$ . ( $\rho = 0,1245 \text{ UTM/m}^3$ .)

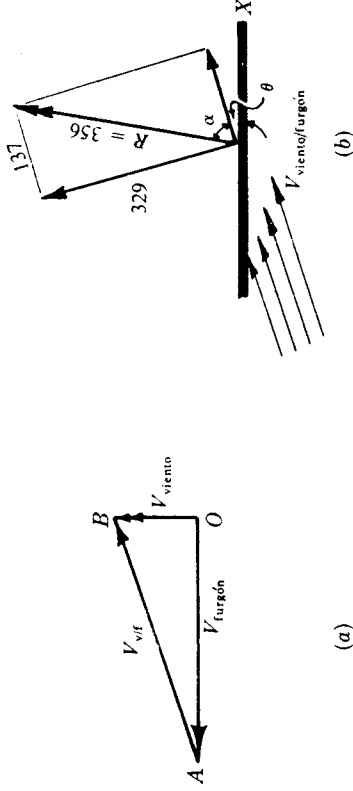


Fig. 11-14

**Solución:**

$$(a) \text{ Fuerza que actúa normal al área} = C_D(\rho/2)AV^2. \text{ Así,}$$

$$\text{Fuerza resultante} = 1,30(0,1245/2)(50)(16.000/3600)^2 = 80 \text{ kg normal al área}$$

- (b) Es necesario calcular la velocidad relativa del viento respecto del furgón. Por composición vectorial,

$$V_{\text{viento}} = V_{\text{viento/furgón}} \leftrightarrow V_{\text{furgón}}$$

La Fig. 11-14(a) indica esta relación vectorial, es decir,

$$OB = OA \leftrightarrow AB = 45,0 \leftrightarrow V_{vif}$$

Por tanto, la velocidad relativa  $= \sqrt{(45)^2 + (16)^2} = 47,8 \text{ km/h}$ , dirigida hacia la derecha y hacia abajo, formando un ángulo  $\theta = \arcsin (16/47,8) = 19,6^\circ$ .

La componente de la resultante, perpendicular a la velocidad relativa del viento respecto del furgón es

$$\begin{aligned}\text{Sustentación} &= C_L(\rho/2)AV^2 = 0,60(0,1245/2)(50)(47800/3600)^2 \\ &= 329 \text{ kg normal a la velocidad relativa}\end{aligned}$$

La componente de la resultante, paralela a la velocidad relativa del viento respecto del furgón, es

$$\begin{aligned}\text{Resistencia} &= C_D(\rho/2)AV^2 = 0,25(0,1245/2)(50)(47800/3600)^2 \\ &= 137 \text{ kg paralela a la velocidad relativa}\end{aligned}$$

Con referencia a la Fig. 11-14(b), la fuerza resultante  $= \sqrt{(329)^2 + (137)^2} = 356 \text{ kg}$ , formando un ángulo  $\alpha = \arctg(329/137) = 67,4^\circ$ . De aquí, el ángulo con el eje longitudinal (eje X) será  $19,6^\circ + 67,4^\circ = 87,0^\circ$ .

**35.** Una cometa pesa 1,10 kg y tiene un área de  $0,75 \text{ m}^2$ .

La fuerza de tracción en el hilo de sujeción de la cometa es de 3,00 kg cuando dicho hilo forma un ángulo con la horizontal de  $45^\circ$ . Para un viento de 32 km/h, ¿cuáles son los coeficientes de sustentación y de resistencia si la cometa forma con la horizontal un ángulo de  $8^\circ$ ? Considerar la cometa como una placa plana y  $w_{\text{aire}} = 1,205 \text{ kg/m}^3$ .

**Solución:**

En la Fig. 11-15 se muestran las fuerzas que actúan sobre la cometa, considerada como un cuerpo libre. Las componentes de la fuerza de tracción sobre el hilo son iguales a 2,12 kg.

$$\text{De } \Sigma X = 0, \quad \text{resistencia} = 2,12 \text{ kg.}$$

$$\text{De } \Sigma Y = 0, \quad \text{sustentación} = 2,12 + 1,10 = 3,22 \text{ kg.}$$

$$\text{Resistencia} = C_D \rho A V^2 / 2, \quad 2,12 = C_D(1,205/9,8)(0,75)(32.000/3600)^2 / 2, \quad C_D = 0,58.$$

$$\text{Sustentación} = C_L \rho A V^2 / 2, \quad 3,22 = C_L(1,205/9,8)(0,75)(32.000/3600)^2 / 2, \quad C_L = 0,88.$$

**36.** Un hombre que pesa 77 kg se lanza desde un avión con un paracaídas de 5,50 m de diámetro. Suponiendo que el coeficiente de resistencia es igual a 1,00 y despreciando el peso del paracaídas ¿cuál será la velocidad límite de descenso?

**Solución:**

Las fuerzas que actúan sobre el paracaídas son el peso del hombre, dirigida hacia abajo, y la resistencia, dirigida hacia arriba.

Para el equilibrio,  $\Sigma Y = 0$  (para velocidad de descenso constante),

$$W = C_D \rho A V^2 / 2, \quad 77 = 1,00(1,205/9,8)(\pi 2,75^2) V^2 / 2, \quad V = 7,3 \text{ m/seg}$$

**37.** Una bola de acero de 3 mm de diámetro y peso específico  $7,87 \text{ g/cm}^3$  cae a través de una masa de aceite de densidad relativa 0,908 y viscosidad cinemática  $1,46 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{seg}$ . ¿Cuál es la velocidad límite alcanzada por la bola?

**Solución:**

Las fuerzas que actúan sobre la bola de acero son el peso de la misma, dirigida hacia abajo; el empuje hidrostático, dirigida hacia arriba, y la resistencia, dirigida hacia arriba. Cuando se alcance la velocidad constante,  $\Sigma Y = 0$ , y transponiendo los términos,

$$\begin{aligned}\text{peso de la esfera} - \text{empuje hidrostático} &= \text{resistencia} \\ u_s(\text{volumen}) - u_o(\text{volumen}) &= C_D \rho A V^2 / 2\end{aligned}$$

$$\text{Utilizando } \text{kg/cm}^3 \times \text{cm}^3 = \text{peso.}$$

$$\frac{4}{3}\pi(0,15)^3(0,00787 - \frac{0,908 \times 1000}{10^6}) = C_D(\frac{0,908 \times 1000}{9,8} \frac{0,003}{2}) \frac{V^2}{2}$$

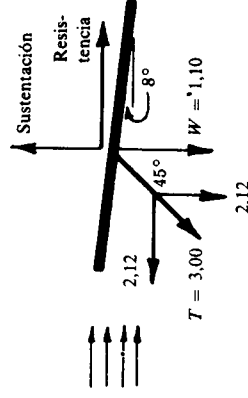


Fig. 11-15

Suponiendo un valor de  $C_D$  de 3,00 (véase Diagrama  $F$ , esferas) y despejando,

$$V'^2 = 0,30/C_D = 0,100 \quad \text{y} \quad V' = 0,316 \text{ m/seg}$$

Se comprueba ahora el valor supuesto para  $C_D$ , se calcula el número de Reynolds y se entra en el Diagrama  $F$ .

$$R_E = \frac{V'd}{\nu} = \frac{0,316 \times 0,003}{1,46 \times 10^{-4}} = 6,5 \quad \text{y} \quad C_D = 6,0 \text{ (aumenta } C_D)$$

Se repiten los cálculos y se comprueba, para  $C_D = 7,0$ ,

$$V'^2 = 0,30/7,0 = 0,0428, \quad V' = 0,207, \quad R_E = 4,22, \quad C_D = 8,1 \text{ (aumenta } C_D)$$

Ensayando  $C_D = 8,5$ ,

$$V'^2 = 0,30/8,5 = 0,0353, \quad V' = 0,188, \quad R_E = 3,86, \quad C_D = 8,5 \text{ (correcto)}$$

Por tanto, la velocidad límite = 0,19 m/seg.

Cuando el número de Reynolds es menor de 0,60, la ecuación para determinar la resistencia puede escribirse en la forma

$$C_D \rho A V'^2/2 = (24/R_E) \rho A \nu V'/2 = (24\nu/Vd) \rho (\pi d^2/4) V'^2/2.$$

Como  $\mu = \rho \nu$ , resistencia =  $3\pi \mu d V'$ .

- 38.** Una esfera de plomo de 25 mm de diámetro y peso específico 11.400 kg/m<sup>3</sup> desciende a través de una masa de aceite a una velocidad constante de 35 cm/seg. Calcular la viscosidad absoluta del aceite si su densidad relativa es 0,93.

**Solución:**

Como en el problema precedente, al utilizar peso = kg/m<sup>3</sup> × m<sup>3</sup>,

$$(w_s - w_o)(\text{volumen}) = C_D \rho A V'^2/2$$

$$\text{Luego } (11.400 - 0,93 \times 1000)(4\pi/3)(0,0125)^3 = C_D(0,93 \times 1000/9,8\pi(0,0125)^2(0,35)^2/2) \quad \text{y} \quad C_D = 30,0.$$

Del Diagrama  $F$ , para  $C_D = 30,0$ ,  $R_E = 0,85$  y

$$0,85 = V'd/\nu = (0,35)(0,025)/\nu, \quad \nu = 0,0103 \text{ m}^2/\text{seg}$$

$$\text{Por tanto,} \quad \mu = \nu \rho = 0,0103(0,93 \times 1000)/9,8 = 0,978 \text{ kg seg/m}^2$$

- 39.** Una esfera de 13 mm de diámetro asciende en una masa de aceite a la velocidad límite de 3,6 cm/seg. ¿Cuál es el peso específico de la esfera si la densidad del aceite es 93 UTM/m<sup>3</sup> y su viscosidad absoluta 0,00347 kg seg/m<sup>2</sup>?

**Solución:**

Para la velocidad límite, constante,  $\Sigma Y = 0$  y

empuje hidrostático - peso - resistencia = 0

$$(4\pi/3)(0,013/2)^3(93 \times 9,8 - w_s) = C_D(93\pi(0,013/2)^2(0,036)^2/2) \\ (911 - w_s) = 6,96C_D \quad (1)$$

El coeficiente de resistencia puede evaluarse mediante el Diagrama  $F$  y el número de Reynolds.

$$\text{Número de Reynolds} = \frac{V'd\rho}{\mu} = \frac{0,036 \times 0,013 \times 93}{0,00347} = 12,53$$

Ahora, del Diagrama  $F$ ,  $C_D = 3,9$  (para esferas) y, a partir de (1),

$$w_s = 911 - 6,96 \times 3,9 = 884 \text{ kg/m}^3$$

40. Para flujos laminares, con números de Reynolds bajos, demostrar que el coeficiente de resistencia de la esfera es igual a 24 dividido por el número de Reynolds (se muestra gráficamente en el Diagrama *F* del Apéndice).

**Solución:**

La resistencia  $F = C_D \rho A V^2/2$ , como se vio anteriormente.

Para flujo laminar la resistencia depende de la viscosidad y velocidad del fluido y del diámetro  $d$  de la esfera. Así,

$$F_D = f(\mu, V, d) = C \mu^a V^b d^c$$

$$F^1 L^0 T^0 = (F^a T^a L^{-2a})(L^b T^{-b})(L^c)$$

$$1 = a. \quad 0 = -2a + b + c, \quad 0 = a - b$$

de donde  $a = 1$ ,  $b = 1$  y  $c = 1$ . Por tanto, resistencia  $F_D = C(\mu V d)$ . G. G. Stokes ha demostrado matemáticamente que  $C = 3\pi$ , lo que ha sido confirmado por la experiencia.

Se igualan ahora las dos expresiones de la resistencia sustituyendo el área proyectada por  $\frac{1}{2}\pi d^2$  y despejando  $C_D$ .

$$3\pi\mu V d = C_D \rho \left(\frac{1}{2}\pi d^2\right) V^2/2 \quad \text{y} \quad C_D = \frac{24\mu}{V d \rho}$$

41. Desarrollar una expresión que dé el espesor  $\delta$  de la capa límite, para el flujo laminar de un fluido que pasa por una placa delgada, suponiendo que la ecuación que da la distribución de velocidades es  $v = V\left(\frac{2y}{\delta} - \frac{y^2}{\delta^2}\right)$ .

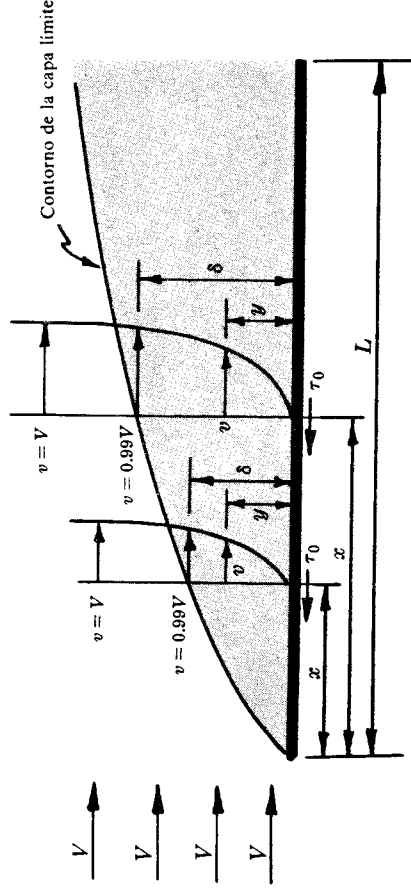


Fig. 11-16

**Solución:**

Se hacen las siguientes hipótesis: que el flujo es permanente ( $\partial v/\partial t = 0$ ), que la velocidad fuera de la capa límite es en todos los puntos igual a la velocidad de aproximación  $V$ , que  $\delta$  es muy pequeño respecto de la distancia  $x$  y que  $dp/dx = 0 = dp/dx$ , satisfaciéndose estas dos últimas tanto en el exterior como en el interior de la capa límite. Además, por definición, el contorno de la capa límite es el lugar geométrico de los puntos en los que la velocidad es 0,99 de la velocidad de aproximación  $V$  (velocidad no perturbada).

La masa que atraviesa cualquier sección de la capa límite, por unidad de anchura, es  $\int_0^\delta \rho v(dy \times 1)$  y la variación de la velocidad en un punto cualquiera es  $(V - v)$ . Además, como las fuerzas debidas a la presión en la sección considerada se equilibran, no intervienen en la variación de la cantidad de movimiento, siendo ésta producida exclusivamente por la fuerza cortante  $\tau_0 dA$  o  $\tau_0(dx \times 1)$ . De lo anterior, la variación en la cantidad de movimiento por unidad de tiempo será

$$\int_0^\delta \rho(V - v)v(dy \times 1)$$

Esta expresión es igual al impulso producido por la fuerza cortante, también en la unidad de tiempo, es decir,

$$\text{Resistencia/unidad de anchura, } F'_D = \int_0^x \tau_0(dx \times 1) = \int_0^\delta \rho(V - v)v(dy \times 1)$$



Sustituyendo la velocidad por su expresión como distribución parabólica en la ecuación anterior

$$\begin{aligned} F'_D &= \int_0^\delta \rho(V - 2yV/\delta + y^2V/\delta^2)(V)(2y/\delta - y^2/\delta^2) dy \\ &= \rho V^2 \int_0^\delta (1 - 2y/\delta + y^2/\delta^2)(2y/\delta - y^2/\delta^2) dy = \frac{1}{15} \rho V^2 \delta \end{aligned} \quad (A)$$

Con el fin de obtener una útil expresión de  $\delta$ , se tiene en cuenta que el flujo es laminar y que  $\tau_0 dx =$  la resistencia unitaria diferencial  $dF'_D$ . Entonces, en  $\tau_0 = \mu(dv/dy)_0$ , el término

$$\left(\frac{dv}{dy}\right)_0 = \frac{d}{dy} \left[ V(2y/\delta - y^2/\delta^2) \right] = \frac{2V}{\delta} (1 - y/\delta) \quad (B)$$

Sustituyendo los valores anteriores en  $\mu(dv/dy)_0 = dF'_D/dx$  y estableciendo que la tensión cortante es igual a  $\tau_0$  cuando  $y = 0$ , se obtiene  $\mu(2V/\delta) = \frac{1}{15} \rho V^2 (d\delta/dx)$  o bien

$$\int_0^\delta \delta d\delta = \frac{15\mu}{\rho V} \int_0^x dx$$

de la que se obtiene

$$\delta^2 = \frac{30\mu x}{\rho V} \quad \text{o} \quad \frac{\delta}{x} = \sqrt{\frac{30\nu}{xV}} = \frac{5.48}{\sqrt{Re_x}} \quad (C)$$

La solución, más exacta, de Blasius da 5.20 como numerador de (C).

42. Para un flujo laminar deducir la expresión que dé (a) la tensión cortante en la pared (en la superficie de la placa) en el problema precedente y (b) el coeficiente de resistencia local  $C_D$ .

**Solución:**

- (a) De (B), Problema 41, cuando  $y = 0$ ,  $\tau_0 = 2\mu V/\delta$ . Entonces, mediante el valor de  $\delta$ , dado por la ecuación (C) anterior,

$$\tau_0 = \frac{2\mu V}{\sqrt{30\mu x/\rho V}} = 0.365 \sqrt{\frac{\rho V^3}{x} \mu} = 0.365 \frac{\rho V^2}{\sqrt{Re_x}} \quad (A)$$

Experimentalmente se ha determinado la fórmula más exacta

$$\tau_0 = 0.33 \sqrt{\frac{\rho V^3}{x} \mu} = 0.33 \frac{\rho V^2}{\sqrt{Re_x}} \quad (B)$$

- (b) El coeficiente de resistencia local  $C_{D_x}$  se obtiene al igualar  $\tau_0 A$  a la resistencia local, es decir,

$$\begin{aligned} F_D &= \tau_0 A = C_{D_x} \rho A V^2/2 \\ \text{o} \quad C_{D_x} &= \frac{2\tau_0}{\rho V^2} = \frac{0.66\rho V^2}{\rho V^2 \sqrt{Re_x}} = \frac{0.66}{\sqrt{Re_x}} \end{aligned} \quad (C)$$

Puede verse que la resistencia total sobre una de las caras de la placa es igual a la suma de todas las ( $\tau_0 dA$ )

$$F_D = \int_0^L \tau_0(dx \cdot 1) = \int_0^L 0.33 \sqrt{\rho V^3 \mu} (x^{-1/2} dx) = 0.33(2L^{1/2}) \sqrt{\rho V^3 \mu}$$

Para la forma usual,  $F_D = C_D \rho A V^2/2$ . Teniendo en cuenta que en este caso  $A = L \times 1$ , se obtiene

$$C_D \rho L V^2/2 = 0.33(2) \sqrt{\rho V^3 \mu L} \quad \text{y} \quad C_D = 1.32 \sqrt{\frac{\mu}{\rho V L}} = \frac{1.32}{\sqrt{Re}} \quad (D)$$

43. Una placa delgada y plana se mantiene paralela a una corriente de aire de 3 m/seg en condiciones normales. Las dimensiones de la placa son 1,20 m por 1,20 m. Calcular (a) la resistencia superficial de la placa, (b) el espesor de la capa límite en el borde de salida (arista posterior de la placa) y (c) la tensión cortante en el borde de salida.

**Solución:**

- (a) Como el coeficiente de resistencia por «rozamiento superficial» depende del número de Reynolds, es necesario determinar  $Re$ .

$$Re = VL/\nu = 3(1.2)/(1.48 \times 10^{-5}) = 243.000 \quad (\text{intervalo laminar})$$

Suponiendo que reina el flujo laminar sobre toda la placa,

$$\text{coeficiente } C_D = 1,328/\sqrt{R_E} = 1,328/\sqrt{243.000} = 0,00269$$

$$\text{Resistencia } D \text{ (sobre las dos caras)} = 2C_D\rho AV^2/2 = (0,00269)(1,205/9,8)(1,2 \times 1,2)(3)^2 = 0,0042 \text{ kg}$$

$$(b) \quad \frac{\delta}{x} = \frac{5,20}{\sqrt{R_{E_x}}} \text{ y } \delta = \frac{5,20(1,2)}{\sqrt{243.000}} = 0,0126 \text{ m} = 12,6 \text{ mm.}$$

$$(c) \quad \tau = 0,33 \frac{\mu V}{x} \sqrt{R_{E_x}} = 0,33 \frac{(1,84 \times 10^{-6})10^3}{1,2} \sqrt{243.000} = 0,00075 \text{ kg/m}^2.$$

44. Una placa lisa de 3,0 m por 1,2 m se mueve a través del aire ( $15^\circ \text{C}$ ) con una velocidad relativa de 1,2 m/seg, manteniéndose el movimiento paralelo a su superficie y a su longitud. Calcular la resistencia en una de las caras de la placa (a) suponiendo condiciones laminares, y (b) suponiendo condiciones turbulentas sobre toda la placa. (c) Para condiciones laminares, calcular el espesor de la capa límite en el centro de la placa y en el borde de salida.

**Solución:**

$$(a) \text{ Se calcula el número de Reynolds: } R_E = VL/\nu = 1,2(3)/(1,47 \times 10^{-5}) = 245.000.$$

$$\text{Para condiciones laminares, } C_D = \frac{1,328}{\sqrt{R_E}} = \frac{1,328}{\sqrt{245.000}} = 0,00268 \text{ (véase también Diagrama } G).$$

$$\text{Resistencia} = C_D\rho AV^2/2 = 0,00268(0,1245)(3 \times 1,2)(1,2)^2/2 = 0,000865 \text{ kg} = 0,865 \text{ g}$$

$$(b) \text{ Para régimen turbulento, con } R_E < 10^7, C_D = \frac{0,074}{R_E^{0,20}} \text{ [véase ecuación (12)].}$$

$$\text{Así, } C_D = \frac{0,074}{(245.000)^{0,20}} = \frac{0,074}{11,97} = 0,00618 \text{ (véase también Diagrama } G).$$

$$\text{Resistencia} = C_D\rho AV^2/2 = 0,00618(0,1245)(3 \times 1,2)(1,2)^2/2 = 0,00200 \text{ kg}$$

$$(c) \text{ Para } x = 1,5 \text{ m, } R_{E_x} = 1,2(1,5)/(1,47 \times 10^{-5}) = 122.500.$$

Obsérvese que el número de Reynolds se ha calculado para  $L = x$  m. Este valor del número de Reynolds se llama número de Reynolds local. Entonces,

$$\delta = \frac{5,20x}{\sqrt{R_{E_x}}} = \frac{(5,20)1,5}{\sqrt{122.500}} = 0,0222 \text{ m} = 22,2 \text{ mm}$$

$$\text{Para } x = 3 \text{ m, } R_E = 245.000 \quad \text{y} \quad \delta = \frac{5,20x}{\sqrt{R_{E_x}}} = \frac{5,20(3)}{\sqrt{245.000}} = 0,0315 \text{ m} = 31,5 \text{ mm}$$

45. Una placa rectangular lisa de 1,2 m por 24 m se mueve a través de una masa de agua a  $21^\circ \text{C}$  en la dirección de su longitud. La resistencia sobre la placa (ambos lados) es de 820 kg. Determinar (a) la velocidad de la placa, (b) el espesor de la capa límite en el borde de salida y (c) la longitud  $x_c$  de la capa límite laminar si en el borde de ataque reinan las condiciones laminares.

**Solución:**

- (a) Para la longitud de la placa y el fluido agua puede considerarse como buena la hipótesis de flujo turbulento. Del Diagrama  $G$ , se supone  $C_D = 0,002$ .

$$\text{Resistencia} = 2C_D\rho AV^2/2, \quad 820 = C_D(102)(1,2 \times 24)V^2$$

$$\text{y} \quad V^2 = \frac{0,278}{C_D} = \frac{0,278}{0,002}, \quad V = 11,8 \text{ m/seg}$$

Número de Reynolds  $R_E = 11,8(24)/(9,8 \times 10^{-7}) = 289 \times 10^6$ . Por tanto, la capa límite es turbulenta, como se había supuesto. Haciendo una nueva aproximación,

$$C_D = \frac{0,455}{(\log 289 \times 10^6)^{2,58}} = 0,00186, \quad V^2 = \frac{0,278}{0,00186} = 150, \quad V = 12,2 \text{ m/seg}$$

Al calcular de nuevo el número de Reynolds, se obtiene  $298 \times 10^6$ ; de aquí,

$$C_D = \frac{0,455}{(\log 298 \times 10^6)^{2,58}} = 0,00184, \quad y \quad V = 12,3 \text{ m/seg}$$

Este valor está dentro de la precisión esperada.

- (b) El espesor de la capa límite, para flujo turbulento, se calcula mediante la ecuación (15).

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0,22}{R_E^{0,167}} \quad y \quad \delta = \frac{0,22(24)}{(298 \times 10^6)^{0,167}} = 0,204 \text{ m}$$

- (c) Suponiendo que el número de Reynolds crítico es 500.000, aproximadamente, es decir, el límite inferior de la zona de transición,

$$R_{E_c} = \frac{Vx_c}{\nu}, \quad 500.000 = \frac{12,3x_c}{9,8 \times 10^{-7}}, \quad x_c = 0,04 \text{ m}$$

46. La placa de 3 m por 1,2 m del Problema 44 se mantiene sumergida en una corriente de 1,2 m/seg de agua a  $10^\circ \text{C}$ , paralelamente a su longitud. Suponiendo las condiciones laminares, en el borde de ataque de la placa, en la capa límite, (a) determinar la posición de paso de capa límite laminar a turbulenta, (b) calcular el espesor de la capa límite en el punto anterior, y (c) calcular la resistencia superficial sobre la placa.

**Solución:**

- (a) Número de Reynolds  $R_E = VL/\nu = 1,2(3)/(1,31 \times 10^{-6}) = 2.740.000$ .

Este valor del número de Reynolds indica que el flujo en la capa límite está en la zona de transición. Suponiendo que el valor crítico del número de Reynolds es igual a 500.000, la localización del punto en que terminan las condiciones laminares puede calcularse mediante la relación

$$\frac{x_c}{L} = \frac{R_E \text{ crítico}}{R_E \text{ para toda la placa}} \quad \text{o bien} \quad x_c = 3\left(\frac{500.000}{2.740.000}\right) = 0,55 \text{ m}$$

- (b) El espesor de la capa límite en este punto se evalúa mediante

$$\delta_c = \frac{5,20x_c}{\sqrt{R_E}} = \frac{5,20(0,55)}{\sqrt{500.000}} = 0,00405 \text{ m} = 4,05 \text{ mm}$$

- (c) La resistencia superficial se calcula sumando a la resistencia producida por la zona de capa límite lámina que llega hasta  $x_c$  (véase Fig. 11-17), la resistencia a que da lugar la zona de capa límite turbulenta, de  $B$  a  $A$ . Este último valor se determina calculando la resistencia como si toda la placa estuviera con capa límite turbulenta y restando a continuación la resistencia producida por la capa límite turbulenta ficticia de  $A$  a  $B$ .

- (1) Resistencia laminar, de  $A$  a  $B$ , sobre una de las caras

$$\text{Resistencia} = C_D \rho A \frac{V^2}{2} = \frac{1,328}{\sqrt{R_E}} \rho A \frac{V^2}{2} = \frac{1,328}{\sqrt{500.000}} (102)(1,2 \times 0,55) \frac{1,2^2}{2} = 0,091 \text{ kg}$$

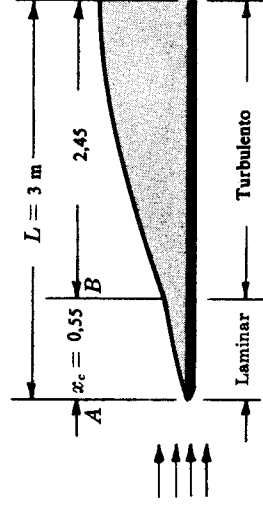


Fig. 11-17

- (2) Resistencia turbulenta, de  $A$  a  $C$ , si las condiciones fueran turbulentas en la longitud total de la placa.

$$\begin{aligned} \text{Resistencia} &= C_D \rho A \frac{V^2}{2} \quad (\text{sobre una de las caras}) \\ &= \frac{0,074}{R_E^{0,20}} \rho A \frac{V^2}{2} = \frac{0,074}{(2.740.000)^{0,20}} (102)(1,2 \times 0,55) \frac{1,2^2}{2} = 1,010 \text{ kg} \end{aligned}$$

- (3) Resistencia turbulenta ficticia, de  $A$  a  $B$ .

$$\begin{aligned} \text{Resistencia} &= C_D \rho A \frac{V^2}{2} \quad (\text{sobre una de las caras}) \\ &= \frac{0,074}{R_E^{0,20}} \rho A \frac{V^2}{2} = \frac{0,074}{(500.000)^{0,20}} (102)(1,2 \times 0,55) \frac{1,2^2}{2} = 0,260 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\text{Resistencia total (ambas caras)} = 2[0,091 + (1,010 - 0,260)] = 1,682 \text{ kg}$$

Si el número de Reynolds, para la placa entera, fuera superior a  $10^5$ , habría que haber utilizado la ecuación (13) del principio del capítulo en la parte (2) anterior.

Podría, ahora, determinarse un valor medio  $C_D'$  para la placa entera, igualando la resistencia total anterior a la expresión que da la resistencia, como sigue.

$$\text{Resistencia total} = 2C_D' \rho A \frac{V^2}{2}, \quad 1,682 = 2C_D'(102)(1,2 \times 3) \frac{1,2^2}{2}, \quad C_D' = 0,00318$$

47. Una esfera de 15 cm de diámetro está inmersa en una corriente de aire a  $20^\circ \text{C}$ . Se midió la fuerza para mantener la esfera en reposo dando 0,114 kg. ¿Qué velocidad tenía la corriente de aire?

**Solución:**

Resistencia total =  $C_D \rho A V^2/2$ , donde  $C_D$  = coeficiente de resistencia global.

Como no pueden determinarse directamente ni el número de Reynolds ni  $C_D$ , se supone  $C_D = 1,00$ . Entonces,

$$0,114 = C_D(0,123)\frac{1}{2}\pi(0,15)^2(V^2/2), \quad V^2 = \frac{105}{C_D}, \quad V = 10,2 \text{ m/seg}$$

Se calcula, ahora,  $R_E = \frac{Vd}{\nu} = \frac{10,2(0,15)}{1,488 \times 10^{-5}} = 103.000$ . Del Diagrama  $F$ ,  $C_D = 0,59$  (para esferas).

Entonces,  $V^2 = \frac{105}{0,59} = 178$ ,  $V = 13,3$  m/seg. Anticipando el resultado, se ensaya  $V = 13,6$  m/seg.

Se recalcula  $R_E = \frac{Vd}{\nu} = \frac{13,6(0,15)}{1,488 \times 10^{-5}} = 137.500$ . Del Diagrama  $F$ ,  $C_D = 0,56$ .

De aquí,  $V^2 = 105/0,56 = 188$ ,  $V = 13,7$  m/seg (precisión satisfactoria).

48. Determinar el aumento de presión que se produce al cerrar instantáneamente una válvula en una tubería de transporte.

**Solución:**

Sea  $p'$  la variación de presión debida al cierre de la válvula. Al aplicar la ecuación del impulso-cantidad de movimiento, para obtener la variación de presión, se llega a

$$F_x = \frac{wQ}{g}(V_2 - V_1) \quad \text{en la dirección } x \quad (A)$$

Despreciando la influencia del rozamiento, la fuerza no equilibrada que produce el cambio en la cantidad de movimiento del líquido de la tubería será  $p'A$ . Entonces la ecuación (A) queda

$$-p'A = \frac{w(Ac)}{g}(0 - V_1) \quad (B)$$

donde  $wAc/g$  representa la masa de líquido que ha cambiado su cantidad de movimiento y  $c$  es la celeridad de la onda de presión. Esta onda de presión reduce a cero la velocidad del fluido al pasar por cada una de las secciones. Así,

$$p' = \rho c V_1 \quad (C)$$

La ecuación (C) puede escribirse en función de la altura de presión  $h'$ , es decir,

$$h' = \frac{cV_1}{g} \quad (D)$$

49. ¿Cuál es la fórmula que da la celeridad de la onda de presión producida por el cierre rápido de una válvula en una tubería de transporte, considerando la tubería rígida (no deformable)?

**Solución:**

Los términos «cierre rápido» o «cierre instantáneo» significan un tiempo de cierre de la válvula cualquiera, siempre que sea  $\leq 2L/c$ . Para obtener una expresión de la celeridad  $c$  se aplicarán los principios de la energía y de la cantidad de movimiento.

La energía cinética del agua se convierte por compresión en energía elástica. La energía cinética del agua es  $MV_1^2/2 = (wAL/g)V_1^2/2$ , donde  $A$  es el área de la sección recta de la tubería y  $L$  su longitud.

El módulo de elasticidad volumétrico del agua es  $E_B = \frac{-\Delta p}{(\Delta \text{ volumen})/(\text{volumen original})}$  (kg/m<sup>2</sup>).

Por tanto, la reducción de volumen,  $\Delta \text{ volumen} = \frac{(\text{volumen})(\Delta p)}{E_B} = \frac{(AL)(wh)}{E_B}$ .

Trabajo de compresión = presión media por la reducción de volumen, es decir,

$$\frac{1}{2}(wAL/g)V_1^2 = \frac{1}{2}wh(ALwh/E_B) \quad (A)$$

$$h^2 = V_1^2 E_B / gw \quad (B)$$

Mediante el principio de la cantidad de movimiento (despreciando el rozamiento), se obtiene

$$MV_1 - \Sigma (F_x dt) = MV_2, \quad -whA = (wQ/g)(0 - V_1), \quad whA = (w/g)(Ac)V_1 \quad (C)$$

$$h = cV_1/g$$

Sustituyendo en (B), se llega a  $c^2 V_1^2 / g^2 = V_1^2 E_B / gw$ , de la cual

$$c = \sqrt{E_B / \rho} \quad (D)$$

50. Desarrollar una expresión que dé la celeridad de una onda de presión, debida al cierre rápido de una válvula en una tubería de transporte, considerando la tubería como deformable.

**Solución:**

En este caso hay que considerar la elasticidad de las paredes de la tubería, en adición a las magnitudes incluidas en la solución del problema precedente.

Para la tubería, el trabajo por la tracción de las paredes de la tubería es igual al producto de la fuerza media ejercida en las paredes de la tubería por la deformación. A partir del diagrama de cuerpo libre de la mitad de la sección recta de la tubería, sabiendo que  $\Sigma Y = 0$ ,  $2T = pdL = whdL$ . Además, la deformación unitaria  $\epsilon = \sigma/E$  donde  $\sigma = pr/t = whr/t$ . (Véase tensión en anillos o tubos de pared delgada en el Capítulo 2.) En esta deducción, la altura  $h$  representa la altura de presión sobre la normal de funcionamiento causada por el cierre rápido de la válvula.

$$\begin{aligned} \text{Trabajo} &= \text{fuerza media} \times \text{deformación} = \frac{1}{2}(whdL)(2\pi r\epsilon) \quad \text{en kgm} \\ &= \frac{1}{4}whdL(2\pi r)(whr/tE) \end{aligned}$$

Sumando este valor al de la ecuación (A) del problema anterior, se obtiene

$$\frac{1}{2}(wAL/g)V_1^2 = \frac{1}{2}wh(ALwh/E_B) + whdL(2\pi whr^2/tE)$$

que, después de sustituir  $h = cV_1/g$ , por (C) del Problema 49, da

$$\frac{V_1^2}{g} = \frac{c^2 V_1^2}{g^2} \left( \frac{w}{E_B} + \frac{wd}{tE} \right)$$

$$\text{Celeridad } c = \sqrt{\frac{1}{\rho(1/E_B + d/Et)}} = \sqrt{\frac{E_B}{\rho(1 + E_B d/Et)}}$$

51. Determinar las celeridades de las ondas de presión que se propagan a lo largo de una tubería rígida que contiene (a) agua a 15° C, (b) glicerina a 20° C y (c) un aceite de  $Dr = 0,800$ . Utilizar, como valores del módulo de elasticidad volumétrico, de la glicerina y del aceite 44.350 y 14.100 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente.

**Solución:**

$$c = \sqrt{\frac{\text{módulo de elasticidad volumétrico en kg/m}^2}{\text{densidad de fluido}}}$$

$$(a) \quad c = \sqrt{\frac{22.000 \times 10^4}{102}} = 1470 \text{ m/seg}$$

$$(b) \quad c = \sqrt{\frac{44.350 \times 10^4}{1.262 \times 1000/9,8}} = 1850 \text{ m/seg}$$

$$(c) \quad c = \sqrt{\frac{14.100 \times 10^4}{0,800 \times 1000/9,8}} = 1310 \text{ m/seg}$$

52. En el Problema 51, si los líquidos fluyeran por una tubería de 30 cm de diámetro a 1,2 m/seg y fueran frenados instantáneamente, ¿qué aumento de presión podría esperarse, suponiendo la tubería rígida?

**Solución:**

Aumento de presión =  $\rho c \times$  variación de la velocidad

$$(a) \text{ Aumento de presión} = 102(1470)(1,2 - 0) = 180.000 \text{ kg/m}^2 = 18,0 \text{ kg/cm}^2.$$

$$(b) \text{ Aumento de presión} = 129(1850)(1,2) = 286.000 \text{ kg/m}^2 = 28,6 \text{ kg/cm}^2.$$

$$(c) \text{ Aumento de presión} = 82(1310)(1,2) = 129.000 \text{ kg/m}^2 = 12,9 \text{ kg/cm}^2.$$

53. Una tubería de acero de 120 cm de diámetro y paredes de 9,5 mm de espesor transporta agua a 15° C y a una velocidad de 1,8 m/seg. Si el tramo de tubería tiene una longitud de 3000 m y una válvula existente en el extremo de descarga se cierra en 2,50 seg, ¿qué aumento en la tensión de las paredes de la tubería puede esperarse?

**Solución:**

La onda de presión se propagará desde la válvula hasta la embocadura de la tubería, retrocediendo de nuevo hasta la válvula en un

$$\text{Tiempo} = 2 \left( \frac{\text{longitud de la tubería}}{\text{celeridad de la onda de presión}} \right)$$

La celeridad de la onda de presión, para una tubería deformable, viene dada por

$$c = \sqrt{\frac{E_B \text{ (kg/m}^2\text{)}}{\rho[1 + (E_B/E)(d/t)]}}$$

donde las dos relaciones del denominador son adimensionales al utilizar unidades acordes.

$$\text{Tomando para el acero } E = 2,10 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2, \quad c = \sqrt{\frac{22.000 \times 10^4}{102 \left[ 1 + \frac{22.000}{2,10 \times 10^6} \left( \frac{120}{0,95} \right) \right]}} = 964 \text{ m/seg}$$

$$\text{y tiempo} = 2(3000/964) = 6,22 \text{ seg.}$$

Como el tiempo de cierre de la válvula es de 2,50 seg, es equivalente a un *cierre instantáneo*, ya que el tiempo de recorrido de ida y vuelta de la onda de presión es superior al tiempo de cierre.

$$\text{Aumento de presión} = \rho c(dV) = 102(964)(1,8) = 176.990 \text{ kg/m}^2 = 17,70 \text{ kg/cm}^2.$$

Por la fórmula que da la tensión en anillos de pared delgada,

$$\text{Tensión de tracción } \sigma = \frac{\text{presión} \times \text{radio}}{\text{espesor}} = \frac{17,70 \times 60}{0,95} = 1120 \text{ kg/cm}^2 \text{ de aumento}$$

Este aumento de la tensión añadido al valor de diseño de  $1130 \text{ kg/cm}^2$  hace que el valor final se aproxime al del límite elástico del acero. La duración del cierre de la válvula debería aumentarse al menos a 6,50 seg, aunque es preferible hacerlo varias veces mayor que los 6,35 seg calculados.

Para el cierre lento de válvulas, cuando el tiempo de cierre es mayor que  $2L/c$ , Norman R. Gibson ha sugerido un método de integración aritmética. En caso necesario, puede consultarse el volumen 83 de las «Transactions of the American Society of Civil Engineers» de 1919.

- 54.** En una tubería de 7,5 cm que transporta glicerina a  $20^\circ \text{C}$  se efectúa el cierre rápido de una válvula. El aumento de presión es de  $7,0 \text{ kg/cm}^2$ . ¿Cuál es el caudal probable en l/seg? Utilizar  $\rho = 129 \text{ UTM/m}^3$  y  $E_B = 44.350 \text{ kg/cm}^2$ .

**Solución:**

El valor de la celeridad, igual a  $1850 \text{ m/seg}$ , se ha calculado ya en el Problema 51.

Aumento de presión  $= \rho c \times \text{variación de la velocidad}$   
 $7,0 \times 10^4 = 129(1850)V$ , de donde  $V = 0,293 \text{ m/seg}$ .

Por tanto,  $Q = AV = \frac{1}{4}\pi(0,075)^2 \times 0,293 \times 10^3 = 1,29 \text{ l/seg}$ .

- 55.** A través de un conducto de ventilación de sección cuadrada de 1,5 m de lado circula aire a una velocidad de  $6,0 \text{ m/seg}$  y  $27^\circ \text{C}$ . Si los dispositivos de control se cierran rápidamente, ¿qué fuerza se ejercerá sobre la superficie de cierre de  $1,5 \text{ m}$  por  $1,5 \text{ m}$ ?

**Solución:**

Para aire a  $27^\circ \text{C}$ ,  $\rho = 120 \text{ UTM/m}^3$  y la celeridad

$$c = \sqrt{kgRT} = \sqrt{1,4(9,8)(29,3)(273 + 27)} = 347,5 \text{ m/seg}.$$

Utilizando ahora  $\Delta p = \rho cV$ , la fuerza

$$F = \Delta p \times \text{área} = (\rho cV)A = 0,120(347,5)(6)(1,5 \times 1,5) = 563 \text{ kg}$$

- 56.** Un transmisor de sonar opera a 2 impulsos por segundo. Si el dispositivo se mantiene en la superficie libre de agua dulce a  $2^\circ \text{C}$  y el eco se recibe en la mitad entre la emisión de dos impulsos, ¿qué profundidad tiene el agua? (Se sabe que la profundidad es menor de  $600 \text{ m}$ .)

**Solución:**

La celeridad de la onda sonora en el agua a  $2^\circ \text{C}$  se calcula mediante

$$c = \sqrt{\frac{\text{mód. volumétrico de elasticidad}}{\text{densidad de fluido}}} = \sqrt{\frac{20.830 \times 10^4}{102}} = 1430 \text{ m/seg}$$

- (a) La distancia recorrida por la onda sonora (hasta llegar al fondo y volver a la superficie) en  $\frac{1}{2}$  de  $\frac{1}{2}$  seg, o sea, en  $\frac{1}{4}$  seg, (la mitad entre dos impulsos) es

$$2 \times \text{profundidad} = \text{velocidad} \times \text{tiempo} \\ = 1430 \times \frac{1}{4} \quad \text{y} \quad \text{profundidad} = 179 \text{ m (mínima profundidad)}$$

- (b) Si la profundidad excediera de  $179 \text{ m}$ , para que el eco se oiga entre dos impulsos (en su punto medio), la onda sonora habrá viajado  $3/2$  de  $1/2$  seg, o sea,  $3/4$  seg. Entonces,

$$\text{profundidad} = \frac{1}{2}(1430) \times \frac{3}{4} = 537 \text{ m}$$

- (c) Para profundidades mayores de  $600 \text{ m}$  se obtendría

$$\begin{aligned} \text{profundidad} &= \frac{1}{2}(1430) \times \frac{5}{4} = 895 \text{ m} \\ \text{profundidad} &= \frac{1}{2}(1430) \times \frac{7}{4} = 1253 \text{ m, y así sucesivamente} \end{aligned}$$

57. Un proyectil se mueve a 660 m/seg a través de aire en reposo a  $38^\circ \text{C}$  y  $1,02 \text{ kg/cm}^2$  (ab). Determinar (a) el número de Mach, (b) el ángulo de Mach y (c) la resistencia para la forma *B* del Diagrama *H*, suponiendo que el diámetro es igual a 20 cm.

**Solución:**

$$(a) \text{ Celeridad } c = \sqrt{kgRT} = \sqrt{1,4(9,8)(29,3)(273 + 38)} = 354 \text{ m/seg.}$$

$$\text{Número de Mach } N_M = \frac{V}{c} = \frac{660}{354} = 1,86$$

$$(b) \text{ Angulo de Mach } \alpha = \arcsen \frac{1}{N_M} = \arcsen \frac{1}{1,86} = 32,5^\circ.$$

$$(c) \text{ Del Diagrama } H, \text{ forma } B, \text{ para un número de Mach de } 1,86, C_D = 0,60.$$

$$\text{El peso específico del aire será } w = \frac{p}{RT} = \frac{1,02 \times 10^4}{29,3(273 + 38)} = 1,1193 \text{ kg/m}^3.$$

$$\text{Resistencia} = C_D \rho A V^2 / 2 = 0,60(1,1193/9,8) \times \frac{1}{4}\pi(0,20)^2 \times (660)^2 / 2 = 468 \text{ kg.}$$

58. El ángulo de Mach, medido en una fotografía del proyectil moviéndose en el aire, fue de  $40^\circ$ . Calcular la velocidad del proyectil, para el aire en las condiciones del problema anterior. (Celeridad  $c = 354 \text{ m/seg.}$ )

**Solución:**

$$\text{Sen } \alpha = \frac{c}{V} = \frac{1}{N_M}. \quad \text{Luego } \text{sen } 40^\circ = \frac{354}{V} \text{ y } V = 550 \text{ m/seg.}$$

59. ¿Qué diámetro debería tener una esfera, de densidad relativa 2,50, para que en caída libre la velocidad límite fuera la velocidad de propagación del sonido? Utilizar  $\rho = 0,1245 \text{ UTM/m}^3$ .

**Solución:**

Para la caída libre de un cuerpo, cuando se alcance la velocidad límite, resistencia – peso = 0 y, del Diagrama *H*,  $C_D = 0,80$ .

$$\text{Para el aire a } 15^\circ \text{C, } c = \sqrt{kgRT} = \sqrt{1,4(9,8)(29,3)(273 + 15)} = 340 \text{ m/seg.}$$

Como

Peso = resistencia

$$(2,50 \times 1000)(4\pi/3)(d/2)^3 = 0,80(0,1245)(\pi d^2/4)(340)^2/2, \quad d = 3,45 \text{ m}$$



## Problemas propuestos

60. Demostrar que el coeficiente de corrección  $\beta$  de la cantidad de movimiento en el Problema 74 del Capítulo 6 es 1,20.
61. Demostrar que el coeficiente de corrección  $\beta$  de la cantidad de movimiento en el Problema 72 del Capítulo 7 es 1,02.
62. Determinar el coeficiente de corrección  $\beta$  de la cantidad de movimiento para el Problema 79 del Capítulo 6.

$$\text{Sol. } \frac{(K+1)^2(K+2)^2}{2(2K+1)(2K+2)}$$

63. Demostrar que el coeficiente de corrección  $\beta$  de la cantidad de movimiento en el Problema 59 del Capítulo 7 es 1,12.
64. Un chorro de aceite de 5 cm de diámetro choca contra una placa plana mantenida en posición normal al eje del chorro. Para una velocidad del chorro de 25 m/seg, calcular la fuerza ejercida sobre la placa por el aceite, de densidad relativa 0,85. *Sol.* 106 kg

65. En el Problema 64, si la placa se mueve en la misma dirección y sentido que el chorro a una velocidad de 9 m/seg, ¿qué fuerza ejercerá el aceite sobre la placa? Si la velocidad de 9 m/seg tiene sentido opuesto al del chorro, ¿qué valor tendría la fuerza anterior? *Sol.* 44 kg, 197 kg

66. Un chorro de agua de 5 cm de diámetro ejerce una fuerza de 270 kg sobre una placa plana mantenida normalmente a la trayectoria del chorro. ¿Cuál es el caudal de desague del chorro? *Sol.* 72 l/seg

67. Un chorro de agua con un caudal de 35 l/seg incide sobre una placa plana mantenida normalmente al eje del chorro. Si la fuerza ejercida sobre la placa es de 75 kg, calcular el diámetro del chorro. *Sol.* 4,6 cm

68. Un chorro de agua de 5 cm de diámetro incide sobre un álabe curvo en reposo que desvía el chorro  $135^\circ$  respecto de su dirección y sentido originales. Despreciando el rozamiento a lo largo del álabe, determinar la fuerza resultante ejercida sobre el álabe si la velocidad del chorro es de 28 m/seg. *Sol.* 290 kg,  $\theta_x = -22,5^\circ$

69. Si en el problema precedente el álabe se mueve en la misma dirección y sentido contrario al del chorro de agua, a una velocidad de 6 m/seg, ¿cuál es la fuerza ejercida sobre el álabe y cuál la potencia requerida para mantener el movimiento? *Sol.* 428, 31,6 CV

70. Un álabe fijo desvía  $180^\circ$  un chorro de agua de 5 cm de diámetro y que se mueve a una velocidad de 35 m/seg. ¿Qué fuerza ejerce el álabe sobre el agua? *Sol.* 492 kg

71. Una tubería horizontal de 30 cm de diámetro se contrae a 15 cm de diámetro. Si el caudal es de 130 l/seg de un aceite de densidad relativa 0,88 y la presión en la tubería de diámetro menor es de  $2,70 \text{ kg/cm}^2$ , ¿cuál es la fuerza resultante ejercida sobre la contracción si se desprecia el rozamiento? *Sol.* 1525 kg

72. Por un codo reductor vertical (véase Fig. 11-18) circulan 350 l/seg de un aceite,  $Dr = 0,85$ , con una presión a la entrada del codo en A de  $1,40 \text{ kg/cm}^2$ . El diámetro en A es de 40 cm y en B de 30 cm y el volumen entre A y B de  $0,10 \text{ m}^3$ . Despreciando el rozamiento, determinar la fuerza sobre el codo.

$$\text{Sol. } 2220 \text{ kg}, \theta_x = -76,2^\circ$$

73. El modelo de una lancha motora es movido a 450 m/seg mediante un chorro de agua de 25 mm de diámetro, expulsado directamente por la popa. La velocidad del chorro con relación al modelo es de 36 m/seg. ¿Cuál es la fuerza motora? *Sol.* 50 kg

74. Una boquilla de 5 cm de diámetro,  $c_v = 0,97$ , descarga un chorro horizontal de aceite,  $Dr = 0,80$ , por la pared lateral de un depósito, bajo una carga de 12 m. ¿Qué fuerza horizontal se ejerce sobre el depósito? *Sol.* 35,5 kg

75. El globo de un niño, de peso 0,10 kg, está lleno de aire,  $\rho = 0,132 \text{ UTM/m}^3$ . El tubo de llenado, de 6 mm de diámetro, se dirige hacia abajo al mismo tiempo que se abre. Si el caudal con que inicialmente se vacía es de 8 l/seg, ¿qué valor tiene la aceleración instantánea si se desprecia el rozamiento? *Sol.*  $19,5 \text{ m/seg}^2$

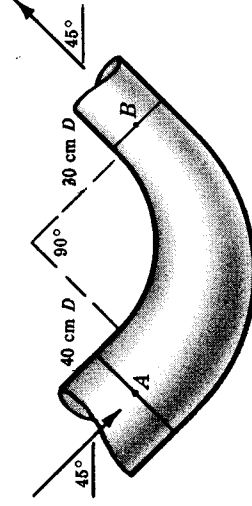


Fig. 11-18

76. Una lancha accionada por un dispositivo de propulsión a chorro se mueve hacia aguas arriba en un río con una velocidad absoluta de 8,60 m/seg. La corriente del río es de 2,30 m/seg. El chorro de agua que arroja el dispositivo tiene una velocidad de 18,0 m/seg respecto de la lancha. Si el caudal del chorro es de 1400 l/seg, ¿qué empuje desarrolla el dispositivo de propulsión? *Sol.* 1015 kg
77. ¿Qué peso sustentará un ala de avión de 50 m<sup>2</sup> con un ángulo de ataque de 4° y una velocidad de 30 m/seg? Utilizar  $C_L = 0,65$  y aire a 15° C. *Sol.* 1830 kg
78. ¿A qué velocidad vuela un avión que pesa 2700 kg si la superficie de sus alas es de 50 m<sup>2</sup> y el ángulo de ataque 8°? Utilizar  $C_L = 0,90$ . *Sol.* 31,0 m/seg
79. ¿Qué superficie de ala debe tener un avión que pesa 900 kg para que pueda aterrizar a una velocidad de 56 km/h? Utilizar el valor máximo de  $C_L = 1,50$ . *Sol.* 39,7 m<sup>2</sup>
80. Si la resistencia sobre un ala de avión de 30 m<sup>2</sup> de superficie es de 310 kg, ¿a qué velocidad debe moverse el perfil con un ángulo de ataque de 7°? Utilizar  $C_D = 0,05$ . *Sol.* 58 m/seg
81. Sobre el plano de una señal de tráfico de 3,60 m por 0,60 m incide el viento a una velocidad de 46 km/h y con un ángulo de 8°. Utilizando los valores  $C_L = 0,52$  y  $C_D = 0,09$ , calcular (a) la fuerza ejercida sobre la señal perpendicularmente a la dirección del viento y (b) la fuerza ejercida paralelamente a la dirección del viento. Suponer aire normal a 15° C. *Sol.* 11,5 kg, 2,0 kg
82. Demostrar que para un ángulo de ataque dado la resistencia sobre un perfil de ala es la misma para cualquier altitud. (Para un ángulo de ataque determinado,  $C_D$  no varía con la altitud.)
83. Un modelo de ala de avión de 1,00 m de alargamiento (longitud) y 10 cm de cuerda se ensaya en el túnel aerodinámico con un ángulo de ataque constante. El aire a presión normal y 27° C circula a 100 km/h. La sustentación y resistencia medidas son, respectivamente, 2,80 kg y 0,23 kg. Determinar los coeficientes de sustentación y resistencia. *Sol.* 0,605, 0,050
84. Calcular el número de Mach para (a) un avión que se mueve a una velocidad de 480 km/h, (b) un cohete que va a 3840 km/h y (c) un proyectil cuya velocidad es de 1920 km/h. Los tres se mueven a través de aire normal a 20° C. *Sol.* 0,388, 3,106, 1,553
85. Un motor turborreactor toma por el difusor de entrada 20 kg/seg de aire cuando se mueve a una velocidad de 210 m/seg. Si el empuje desarrollado es de 1220 kg cuando la velocidad de eyección de los gases es de 750 m/seg, ¿cuál es el peso del combustible consumido por segundo? *Sol.* 1,28 kg/seg
86. Por el conducto de entrada de un motor a reacción penetra el aire a la presión atmosférica y a una velocidad de 150 m/seg. El combustible se quema en el motor a razón de 1 parte por 50 partes de aire entrante en peso. El área de la sección de entrada es de 1550 cm<sup>2</sup> y la densidad del aire 0,126 UTM/m<sup>3</sup>. Si la velocidad de eyección de los gases es de 1500 m/seg y la presión la atmosférica, ¿qué empuje desarrolla el motor? *Sol.* 4045 kg
87. Un automóvil tiene un área proyectada de 3,20 m<sup>2</sup> y se mueve a una velocidad de 80 km/h en aire en reposo a 27° C. Si  $C_D = 0,45$ , ¿qué potencia se consume para vencer la resistencia? *Sol.* 12,6 CV
88. Un tren de 150 m de longitud se mueve a través de aire normal a 15° C a una velocidad de 120 km/h. Se consideran los 1500 m<sup>2</sup> de superficie del tren como si pertenecieran a una placa plana. Para una capa límite turbulenta desde el borde de ataque, ¿cuál es la resistencia superficial debida a la fricción? *Sol.* 187 kg
89. Un cilindro de 60 cm de diámetro y 4,5 m de longitud se mueve a 50 km/h a través de agua a 15° C (paralelamente a su longitud), ¿Cuál es el coeficiente de resistencia si la resistencia superficial es de 165 kg? *Sol.*  $C_D = 0,002$
90. Calcular la resistencia superficial debida al rozamiento sobre una placa plana de 30 cm de anchura y 90 cm de longitud, colocada longitudinalmente (a) en una corriente de agua a 21° C que fluye a una velocidad de 30 cm/seg y (b) en una corriente de un fuel-oil pesado a 21° C y una velocidad de 30 cm/seg. *Sol.* 0,0064 kg, 0,0696 kg
91. Un globo de 1,20 m de diámetro, que pesa 1,80 kg, está sometido a un empuje hidrostático medio de 2,25 kg. Utilizando  $\rho = 0,120$  UTM/m<sup>3</sup> y  $v = 1,58 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/seg, evaluar la velocidad con que ascenderá. *Sol.* 6,07 m/seg

92. Calcular la velocidad límite a que caerá un grano de granizo de 13 mm de diámetro si la temperatura del aire es igual a  $4,5^{\circ}\text{C}$  y la densidad relativa del granizo 0,90. *Sol.* 16,5 m/seg
93. Un objeto que tiene un área proyectada de  $0,60\text{ m}^2$  se mueve a una velocidad de 50 km/h. Si el coeficiente de resistencia es de 0,30, calcular la resistencia al moverse a través de agua a  $15^{\circ}\text{C}$  y a través de aire normal a  $15^{\circ}\text{C}$ . *Sol.* 1770 kg, 2,16 kg
94. Un cuerpo se mueve a través de aire normal a  $15^{\circ}\text{C}$  a una velocidad de 80 km/h y para mantener esta velocidad se requiere una potencia de 5,5 CV. Si el área proyectada es de  $1,20\text{ m}^2$ , determinar el coeficiente de resistencia. *Sol.* 0,503
95. Una placa rectangular lisa de 0,60 m de anchura por 24,0 m de longitud se mueve a una velocidad de 12,0 m/seg en la dirección de su longitud a través de una masa de aceite. Calcular la resistencia sobre la placa y el espesor de la capa límite en el borde de salida. ¿Sobre qué longitud de la placa se mantiene la capa límite laminar? Utilizar la viscosidad cinemática  $= 1,49 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{seg}$  y  $w = 850\text{ kg/m}^3$ . *Sol.* 471 kg, 0,321 m, 0,622 m
96. Suponiendo rígida una tubería de acero de 60 cm, ¿qué aumento de presión tiene lugar cuando se frena instantáneamente un flujo de 560 l/seg de aceite, de densidad relativa 0,85 y módulo de elasticidad volumétrico  $17.500\text{ kg/cm}^2$ ? *Sol.* 24,4 kg/cm<sup>2</sup>
97. Si la tubería del Problema 96 tiene 2400 m de longitud, ¿qué tiempo debe durar la operación de cierre de una válvula para evitar el golpe de ariete? *Sol.* Más de 3,38 seg
98. Si una tubería de 60 cm de diámetro y 2400 m de longitud se ha diseñado para una tensión de trabajo de  $1050\text{ kg/cm}^2$ , bajo una presión estática máxima de 325 m de agua, ¿cuál será el aumento de tensión en las paredes de la tubería por el cierre instantáneo de una válvula que frena un flujo de 840 l/seg? ( $E_s = 21.000\text{ kg/cm}^2$ .) *Sol.* 33,90 kg/cm<sup>2</sup>
99. Calcular el ángulo de Mach para una bala que lleva una velocidad de 510 m/seg a través del aire a  $1,033\text{ kg/cm}^2$  y  $15^{\circ}\text{C}$ . *Sol.*  $41^{\circ}51'$
100. ¿Cuál es el valor de la resistencia de un proyectil (forma A, Diagrama H) de 100 mm de calibre cuando lleva una velocidad de 570 m/seg a través del aire a  $10^{\circ}\text{C}$  y  $1,033\text{ kg/cm}^2$ ? *Sol.* 84,3 kg

# Capítulo 12

## Maquinaria hidráulica

### MAQUINARIA HIDRAULICA

Se dan aquí unas consideraciones sobre los principios fundamentales en que se basa el diseño de bombas, soplantes, turbinas y hélices. Las bases esenciales son los principios del impulso-cantidad de movimiento (Capítulo 11) y del vórtice forzado (Capítulo 4), y las leyes de semejanza (Capítulo 5). Las modernas turbinas hidráulicas y bombas centrifugas son máquinas de gran rendimiento con pocas diferencias en sus características. Para cada diseño hay una relación definida entre la velocidad de giro  $N$ , el gasto o caudal  $Q$ , la altura de carga  $H$ , el diámetro  $D$  del rodete y la potencia  $P$ .

**EN EL CASO DE RODETES**, el par y la potencia producida vienen definidos por

$$\text{Par } T \text{ en mkg} = \frac{wQ}{g} (V_2 r_2 \cos \alpha_2 - V_1 r_1 \cos \alpha_1) \quad (1)$$

$$\text{y} \quad \text{Potencia } P \text{ en mkg/seg} = \frac{wQ}{g} (V_2 u_2 \cos \alpha_2 - V_1 u_1 \cos \alpha_1) \quad (2)$$

El desarrollo y notación se explican en el Problema 1.

### RUEDAS HIDRAULICAS, BOMBAS Y SOPLANTES

Estas máquinas tienen un cierto número de constantes que, comúnmente, se determinan. En el Problema 5 se dan detalles.

1. El factor de velocidad  $\phi$  se define como

$$\phi = \frac{\text{velocidad periférica del rodete}}{\sqrt{2gH}} = \frac{u}{\sqrt{2gH}} \quad (3)$$

donde  $u$  = radio del rodete en m  $\times$  velocidad angular en radianes/seg =  $r\omega$  m/seg.

Este factor se expresa también de la forma

$$\phi = \frac{\text{diámetro en cm} \times \text{rpm}}{8460\sqrt{H}} = \frac{D_1 N}{8460\sqrt{H}} \quad (4)$$

2a. La relación de velocidad puede expresarse así

$$\frac{\text{diámetro } D \text{ en m} \times \text{velocidad } N \text{ en rpm}}{\sqrt{g \times \text{altura } H \text{ en m}}} = \text{constante } C'_N \quad (5a)$$

También

$$H = \frac{D^2 N^2}{C_N^2} \quad (5b)$$

en donde  $g$  se engloba en el coeficiente  $C_N$

2b. La *velocidad unitaria* se define como la velocidad de un rodete geoméricamente semejante (homólogo) que tiene un diámetro de 1 cm, operando bajo una altura de 1 m. Esta velocidad unida ( $N_u$  en rpm) se expresa normalmente en función de  $D_1$  en cm y  $N$  en rpm. Así., pues,

$$N_u = \frac{D \text{ en cm} \times \text{rpm}}{\sqrt{H}} = \frac{D_1 N}{\sqrt{H}} \quad (6a)$$

$$\text{También} \quad N = N_u \frac{\sqrt{H}}{D_1} \quad (6b)$$

3a. La *relación de caudal* puede expresarse de la forma

$$\frac{\text{caudal } Q \text{ en m}^3/\text{seg}}{(\text{diámetro } D \text{ en m})^2 \sqrt{\text{altura } H \text{ en m}}} = \text{constante } C_Q \quad (7a)$$

$$\text{También} \quad Q = C_Q D^2 \sqrt{H} = C_Q D^2 \left( \frac{DN}{C_N} \right) = C'_Q D^3 N \quad (7b)$$

El coeficiente  $C_Q$  puede expresarse también tomando como unidad de caudal 1/min. Al tomar estos coeficientes de textos o manuales, las unidades deberán comprobarse para no incurrir en errores.

Si  $C_Q$  es igual para dos unidades homólogas, entonces  $C_N$ ,  $C_P$  y el rendimiento serán los mismos, salvo en el caso de fluidos muy viscosos.

3b. El *caudal unitario* se define como el caudal de un rodete homólogo de 1 cm de diámetro, operando bajo una altura de 1 m. El caudal unitario  $Q_u$  en m<sup>3</sup>/seg se escribe de la forma

$$Q_u = \frac{\text{caudal } Q \text{ en m}^3/\text{seg}}{(\text{diámetro } D \text{ en cm})^2 \sqrt{\text{altura } H \text{ en m}}} = \frac{Q}{D_1^2 \sqrt{H}} \quad (8a)$$

$$\text{También} \quad Q = Q_u D_1^2 \sqrt{H} \quad (8b)$$

4a. La *relación de potencia*, obtenida al emplear los valores de  $Q$  y  $H$  en las ecuaciones (7b) y (5a) es

$$\text{Potencia en CV} \quad P = \frac{wQH}{75e} = \frac{w(C_Q D^2 \sqrt{H})H}{75e} = C_P D^2 H^{3/2} \quad (9a)$$

$$\text{También} \quad P = \frac{w(C'_Q D^3 N)}{75e} \times \frac{D^2 N^2}{g(C'_N)^2} = C_{PP} D^5 N^3 \quad (9b)$$

4b. La *potencia unitaria* se define como la potencia desarrollada por un rodete homólogo de 1 cm de diámetro, operando bajo una altura de 1 m. La potencia unitaria  $P_u$  es

$$P_u = \frac{P}{D_1^2 H^{3/2}} \quad \text{y} \quad P = P_u D_1^2 H^{3/2} \quad (10)$$

## VELOCIDAD ESPECIFICA

La velocidad específica se define como la velocidad de un rodete con un diámetro tal que desarrolle 1 caballo de vapor de potencia para una altura de 1 m (véase Problema 5). La velocidad específica  $N_s$  puede expresarse de las dos siguientes formas:

1. Para turbinas:

$$N_s = \frac{N \sqrt{P}}{\sqrt{\rho(gH)^{5/4}}}, \quad \text{que representa la ecuación general.} \quad (11a)$$

$$\text{también} \quad N_s = N_u \sqrt{P_u} = \frac{N \sqrt{P}}{H^{5/4}} \quad \text{de corriente aplicación en turbinas de agua.} \quad (11b)$$

## 2. Para bombas y soplantes:

$$N_s = \frac{N\sqrt{Q}}{(gH)^{3/4}} \text{ representa la ecuación general.} \quad (12a)$$

$$\text{También} \quad N_s = N_u\sqrt{Q_u} = \frac{N\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \text{ de corriente aplicación.} \quad (12b)$$

**RENDIMIENTO**

El rendimiento se expresa como una relación adimensional. Varía con la velocidad y el caudal.

$$\text{Para turbinas, rendimiento total } e = \frac{\text{potencia en el eje}}{\text{potencia suministrada por el agua}} \quad (13)$$

$$\text{rendimiento hidráulico } e_h = \frac{\text{potencia utilizada}}{\text{potencia suministrada por el agua}}$$

$$\text{Para bombas, rendimiento } e = \frac{\text{potencia a la salida}}{\text{potencia a la entrada}} = \frac{wQH}{\text{potencia a la entrada}} \quad (14)$$

**CAVITACION**

La cavitación causa la destrucción rápida del metal constituyente de los rodetes de las bombas y turbinas, de los álabes, de los venturímetros y, en ocasiones, de las tuberías. Esto sucede cuando la presión del líquido se hace menor que su tensión de vapor. Se remite al lector a obras tales como *Engineering Hydraulics*, Actas de la Cuarta Conferencia de Hidráulica, para una ampliación de este tema concreto.

**PROPULSION POR HELICES**

La propulsión por hélices ha sido durante mucho tiempo la potencia motriz de aviones y barcos. Por otra parte, las hélices se han empleado como ventiladores y como medios para producir potencia a partir del viento. El diseño de hélices no se aborda aquí, pero se dan las importantes expresiones en mecánica de fluidos del empuje y potencia. Tales expresiones, desarrolladas en el Problema 23, son:

$$\text{Empuje } F = \frac{wQ}{g} (V_{\text{final}} - V_{\text{inicial}}) \text{ en kg} \quad (15)$$

$$\text{Potencia a la salida } P_0 = \frac{wQ}{g} (V_{\text{final}} - V_{\text{inicial}}) V_{\text{inicial}} \text{ en kg/seg} \quad (16)$$

$$\text{Potencia a la entrada } P_i = \frac{wQ}{g} \left( \frac{V_{\text{final}}^2 - V_{\text{inicial}}^2}{2} \right) \quad (17)$$

$$\text{Rendimiento } e = \frac{\text{potencia a la salida}}{\text{potencia a la entrada}} = \frac{2V_{\text{inicial}}}{V_{\text{final}} + V_{\text{inicial}}} \quad (18)$$

**LOS COEFICIENTES DE LA HELICE** se refieren al empuje, al par y a la potencia. Pueden expresarse de la forma siguiente:

$$\text{Coeficiente de empuje } C_F = \frac{\text{empuje } F \text{ en kg}}{\rho N^2 D^4} \quad (19)$$

$$\text{Valores altos de } C_F \text{ producen una buena propulsión,}$$

$$\text{Coeficiente de par } C_T = \frac{\text{par } T \text{ en m kg}}{\rho N^2 D^5} \quad (20)$$

Valores altos de  $C_T$  son normales en turbinas y molinos de viento.

$$\text{Coeficiente de potencia } C_p = \frac{\text{potencia } P \text{ en kg m/seg}}{\rho N^3 D^5} \quad (21)$$

Este último coeficiente tiene la misma forma que en la ecuación (9b) anterior.

Estos tres coeficientes son adimensionales si  $N$  se expresa en revoluciones por segundo.

## Problemas resueltos

1. Determinar el par y la potencia desarrollados por un rodete (tal como el de una bomba o turbina) en condiciones de flujo permanente.

### Solución:

La Fig. 12-1 representa un rodete formado por canales curvos por los que el agua entra por el lado de radio  $r_1$  y sale por el lado de radio  $r_2$ . Las velocidades relativas del agua con respecto a un álabe se representan por  $v_1$  entrando por (1) y por  $v_2$  saliendo por (2). La velocidad lineal del álabe es  $u_1$  en (1) y  $u_2$  en (2). Los diagramas vectoriales indican las velocidades absolutas del agua ( $V_1$  y  $V_2$ ).

Para la masa elemental de agua que pasa en  $dt$  segundos, la variación del momento de la cantidad de movimiento se origina por el momento cinético ejercido por el rodete. Es decir, momento de la cantidad de movimiento inicial + momento cinético = momento de la cantidad de movimiento final

$$0 \quad (dM)V_1 \times r_1 \cos \alpha_1 + \quad \text{par} \quad \times dt = (dM)V_2 \times r_2 \cos \alpha_2$$

Pero  $dM = (w/g)Q dt$ . Sustituyendo y despejando el par ejercido sobre el agua, obtenemos

$$\text{par } T = \frac{w}{g} Q (V_2 r_2 \cos \alpha_2 - V_1 r_1 \cos \alpha_1)$$

Por consiguiente, el par ejercido por el fluido sobre el rodete es

$$T = \frac{w}{g} Q (V_1 r_1 \cos \alpha_1 - V_2 r_2 \cos \alpha_2) \quad \text{en kg m}$$

La potencia es igual al par por la velocidad angular. Luego

$$P = T\omega = \frac{w}{g} Q (V_1 r_1 \cos \alpha_1 - V_2 r_2 \cos \alpha_2) \omega$$

Puesto que  $u_1 = r_1 \omega$  y  $u_2 = r_2 \omega$ , la expresión se transforma en

$$P = \frac{w}{g} Q (V_1 u_1 \cos \alpha_1 - V_2 u_2 \cos \alpha_2) \quad \text{en kg m/seg} \quad (1)$$

Las expresiones desarrolladas aquí son aplicables tanto a las bombas como a las turbinas. El punto importante es que, en el desarrollo, el punto (1) estaba *aguas arriba* y el (2), *aguas abajo*.

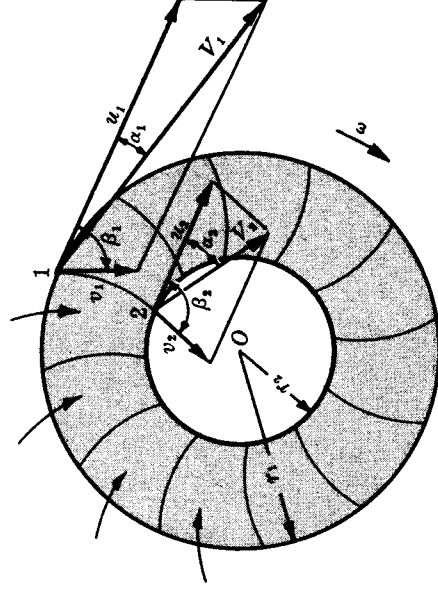


Fig. 12-1

## 2. Establecer la ecuación de Bernoulli para un rodete de turbina.

### Solución:

Escribiendo la ecuación de Bernoulli entre los puntos (1) y (2) en la figura del Problema 1, obtenemos

$$\left(\frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{w} + z_1\right) - H_T - \text{pérdida de carga } H_L = \left(\frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{w} + z_2\right)$$

Del diagrama vectorial del Problema 1

$$\begin{aligned} V_1^2 &= u_1^2 + v_1^2 + 2u_1v_1\cos\beta_1 \\ V_2^2 &= u_2^2 + v_2^2 + 2u_2v_2\cos\beta_2 \end{aligned}$$

y

Por otra parte, haciendo  $V_1 \cos \alpha_1 = a_1$  y  $V_2 \cos \alpha_2 = a_2$ , podemos calcular a partir del diagrama vectorial

$$a_1 = u_1 + v_1 \cos \beta_1 \quad y \quad a_2 = u_2 + v_2 \cos \beta_2$$

$$\begin{aligned} \text{Además,} \quad H_T \text{ m kg/kg} &= \frac{wQ}{g} (V_1 u_1 \cos \alpha_1 - V_2 u_2 \cos \alpha_2) : wQ \\ &= \frac{1}{g} (u_1 V_1 \cos \alpha_1 - u_2 V_2 \cos \alpha_2) \end{aligned} \quad (1)$$

Los términos de altura de velocidad y altura de carga de la turbina en la ecuación de Bernoulli anterior serían entonces

$$\frac{u_1^2 + v_1^2 + 2u_1v_1\cos\beta_1}{2g}, \quad \frac{2(u_1a_1 - u_2a_2)}{2g}, \quad \frac{u_2^2 + v_2^2 + 2u_2v_2\cos\beta_2}{2g}$$

Simplificando e incorporando estos términos en la ecuación de Bernoulli, se obtiene

$$\left(\frac{v_1^2}{2g} - \frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{w} + z_1\right) + \frac{u_2^2}{2g} - H_L = \left(\frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{w} + z_2\right)$$

$$\text{o} \quad \left(\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{w} + z_1\right) - \left(\frac{u_1^2 - u_2^2}{2g}\right) - H_L = \left(\frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{w} + z_2\right) \quad (2)$$

en donde las velocidades  $v$  son valores relativos y el término en el segundo paréntesis se designa como altura de carga creada por el vórtice forzado o altura de carga centrífuga.

3. Una turbina gira a 100 rpm y desagua 0,810 m<sup>3</sup>/seg. La altura de presión a la salida es 0,30 m y el rendimiento hidráulico en estas condiciones es del 78,5 %. Los datos físicos son:  $r_1 = 0,45$  m,  $r_2 = 0,21$  m,  $\alpha_1 = 15^\circ$ ,  $\beta_2 = 135^\circ$ ,  $A_1 = 0,115$  m<sup>2</sup>,  $A_2 = 0,075$  m<sup>2</sup>,  $z_1 = z_2$ . Suponiendo una pérdida de carga de 1,20 m, determinar (a) la potencia dada a la turbina, (b) la altura de carga total disponible y la altura de carga utilizada y (c) la presión a la entrada.

### Solución:

- (a) Antes de sustituir en la ecuación de potencia [ecuación (1) del Problema 1] deben hacerse cálculos preliminares.

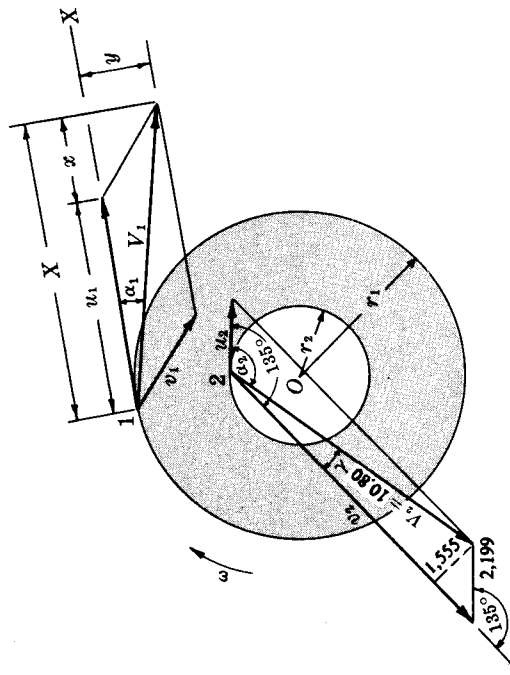


Fig. 12-2



$$V_1 = Q/A_1 = 0.810/0.115 = 7.043 \text{ m/seg.} \quad V_2 = 0.810/0.075 = 10.800 \text{ m/seg.}$$

$$V_1 \cos \alpha_1 = 7.043 \times 0.966 = 6.804 \text{ m/seg.}$$

$$u_1 = 0.45(2\pi)(100/60) = 4.712 \text{ m/seg.} \quad u_2 = 0.21(2\pi)(100/60) = 2.199 \text{ m/seg.}$$

Del diagrama vectorial de la Fig. 12-2, donde  $\gamma = \arcsen 1.555/10.800 = 8^\circ 17'$ , obtenemos

$$\alpha_2 = 135^\circ - \gamma = 126^\circ 43' \quad y \quad V_2 \cos \alpha_2 = 10.800(-0.598) = -6.458 \text{ m/seg}$$

$$\text{Luego potencia } P = \frac{1000 \times 0.810}{75 \times 9.8} [6.804(4.712) - 2.199(-6.458)] = 50.98 \text{ CV.}$$

$$(b) \text{ Rendimiento} = \frac{\text{potencia de salida}}{\text{potencia de entrada}} = \frac{\text{altura de carga utilizada}}{\text{altura de carga disponible}}$$

$$\text{Pero carga utilizada} = \frac{\text{caballos de vapor utilizados} \times 75}{wQ} \quad \text{o} \quad H_T = \frac{50.98 \times 75}{1000 \times 0.810} = 4.720 \text{ m}$$

$$\text{Por consiguiente,} \quad \text{carga disponible} = 4.720/0.785 = 6.013 \text{ m}$$

(c) A fin de aplicar la ecuación (2) del problema anterior, debemos calcular las dos velocidades relativas. Re-  
firiéndose otra vez al diagrama vectorial anterior, obtenemos

$$X = 7.043 \cos 15^\circ = 7.043(0.966) = 6.804 \text{ m/seg [como en (a)]}$$

$$Y = 7.043 \sin 15^\circ = 7.043(0.259) = 1.824 \text{ m/seg}$$

$$X = (X - u_1) = 6.804 - 4.712 = 2.092 \text{ m/seg}$$

$$v_1 = \sqrt{(1.824)^2 + (2.092)^2} = \sqrt{7.703} = 2.775 \text{ m/seg}$$

De manera análoga,

$$v_2 = V_2 \cos \gamma + u_2 \cos 45^\circ = 10.800(0.990) + 2.199(0.707) = 12.247 \text{ m/seg}$$

La ecuación de Bernoulli da

$$\left[ \frac{(2.775)^2}{2g} + \frac{p_1}{w} + 0 \right] - \left[ \frac{(4.712)^2}{2g} - \frac{(2.199)^2}{2g} \right] - 1.200 = \left[ \frac{(12.247)^2}{2g} + 0.300 + 0 \right]$$

de donde  $p_1/w = 9.646 \text{ m.}$

4. Determinar el valor de la altura de carga desarrollada por el rodete de una bomba.

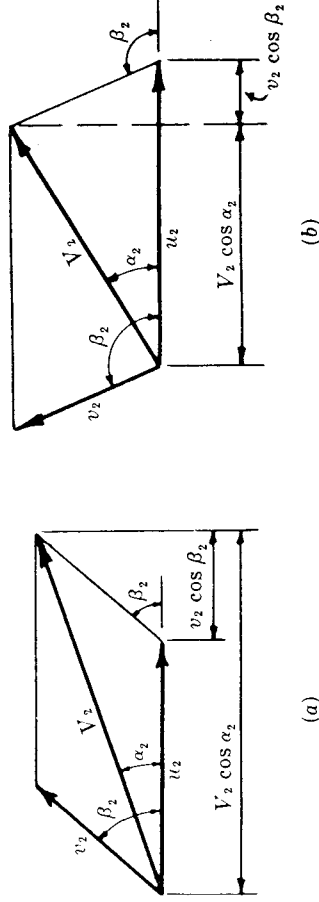


Fig. 12-3

**Solución:**

La expresión (1) del Problema 1, aplicada en la dirección del flujo en una bomba (donde  $r_1$  es el radio interior, etc.), da

$$\text{Potencia de entrada} = \frac{wQ}{g} (u_2 V_2 \cos \alpha_2 - u_1 V_1 \cos \alpha_1)$$

y la carga comunicada por el rodete se obtiene dividiendo por  $wQ$ . luego

$$\text{carga } H' = \frac{1}{g} (u_2 V_2 \cos \alpha_2 - u_1 V_1 \cos \alpha_1)$$

En muchas bombas el flujo en el punto (1) puede suponerse radial y el valor del término  $u_1 V_1 \cos \alpha_1$  es cero. Entonces la ecuación anterior se transforma en

$$\text{carga } H' = \frac{1}{g} (u_2 V_2 \cos \alpha_2) \quad (1)$$

En la Fig. 12-3(a) y (b) se ve que  $V_2 \cos \alpha_2$  puede expresarse en función de  $u_2$  y  $v_2$ , es decir.

$$V_2 \cos \alpha_2 = u_2 + v_2 \cos \beta_2$$

en donde hay que tener en cuenta el signo de  $\cos \beta_2$ . Entonces,

$$\text{carga } H' = \frac{u_2}{g} (u_2 + v_2 \cos \beta_2) \quad (2)$$

Por otra parte, de los triángulos vectoriales,

$$V_2^2 = u_2^2 + v_2^2 - 2u_2 v_2 \cos (180^\circ - \beta_2)$$

que podemos escribir de la forma

$$u_2 v_2 \cos \beta_2 = \frac{1}{2} (V_2^2 - u_2^2 - v_2^2)$$

La ecuación (2) se transforma en

$$\text{carga } H' = \frac{u_2^2}{2g} + \frac{V_2^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g}$$

La carga desarrollada por la bomba será menor que el valor dado por esta expresión ya que existen pérdidas en el rodete y pérdidas a la salida. Luego

$$\text{Carga desarrollada } H = \left( \frac{u_2^2}{2g} + \frac{V_2^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \right) - \text{pérdida en el rodete} - \text{pérdida en la salida}$$

$$H = \left( \frac{u_2^2}{2g} + \frac{V_2^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \right) - K_1 \frac{v_2^2}{2g} - K_2 \frac{V_2^2}{2g}$$

5. Calcular para bombas y turbinas (a) el factor de velocidad  $\phi$ , (b) la velocidad unitaria  $N_u$ , (c) el caudal unitario  $Q_u$ , (d) la potencia unitaria  $P_u$  y (e) la velocidad específica.

**Solución:**

(a) Por definición,  $\phi = \frac{u}{\sqrt{2gH}}$ . Pero  $u = r\omega = r \frac{2\pi N}{60} = \frac{\pi D_1 N}{60}$ , donde  $D_1$  es el diámetro en cm

y  $N$  la velocidad en revoluciones por minuto. Finalmente,

$$\phi = \frac{\pi D_1 N}{6000} \times \frac{1}{\sqrt{2gH}} = \frac{D_1 N}{8460 \sqrt{H}} \quad (1a)$$

(b) Si  $D_1 = 1$  cm y  $H = 1$  m, obtenemos de la ecuación (1a) anterior la velocidad unitaria  $N_u$ . Así, pues,

$$N_u = 8460 \phi \quad (1b)$$

que es constante para todas las ruedas de diseño semejante si  $\phi$  se refiere a la velocidad óptima. También, de la (1a) anterior,

$$N_u = \frac{D_1 N}{\sqrt{H}} \quad \text{en rpm} \quad (2)$$

Así, pues, para rodetes homólogos, la velocidad óptima  $N$  varía inversamente al diámetro y directamente a la raíz cuadrada de  $H$ .

(c) Para la turbina tangencial, el caudal  $Q$  puede expresarse como

$$Q = cA\sqrt{2gH} = c \frac{\pi d_1^2}{4 \times 10.000} \sqrt{2gH} = \frac{c\pi\sqrt{2g}}{40.000} \left(\frac{d_1}{D_1}\right)^2 D_1^2 \sqrt{H}$$

$$= (\text{factor}) D_1^2 \sqrt{H} = Q_u D_1^2 \sqrt{H} \quad (3)$$

Para  $D_1 = 1$  cm y  $H = 1$  m, el factor se define como caudal unitario  $Q_u$ .

Para turbinas de reacción y bombas, el caudal  $Q$  puede expresarse como el producto de

(c)(A)(componente de velocidad)

La componente de velocidad depende de la raíz cuadrada de  $H$  y el seno del ángulo  $\alpha_1$  (véase Fig. 12-1 del Problema 1). Por consiguiente, el caudal  $Q$  puede escribirse en la forma de la ecuación (3) anterior.

(d) Aplicando la expresión (3) anterior,

$$\text{potencia } P = \frac{wQH}{75} = \frac{w(Q_u D_1^2 \sqrt{H})H}{75}$$

Para  $D_1 = 1$  cm y  $H = 1$  m, la potencia =  $wQ_u/75 = (\text{factor})$ . Cuando el rendimiento se incluye en la potencia de salida para turbinas y la potencia del agua para bombas, el factor se transforma en la potencia unitaria  $P_u$ . Luego,

$$\text{potencia } P = P_u D_1^2 H^{3/2} \quad (4)$$

(e) En la ecuación (4) podemos sustituir  $D_1$  por su valor dado en la expresión (2) anterior, obteniendo

$$\text{potencia } P = P_u \frac{N_u^2 H}{N^2} H^{3/2} \quad (5)$$

$$\text{También} \quad P_u N_u^2 = \frac{PN^2}{H^{5/2}} \quad \text{o} \quad N_u \sqrt{P_u} = \frac{N\sqrt{P}}{H^{3/4}} \quad (6)$$

El término  $N_u \sqrt{P_u}$  se llama velocidad específica  $N_s$ . La expresión (5) se convierte entonces en

$$N_s = \frac{N\sqrt{P}}{H^{3/4}} \quad (\text{para turbinas}) \quad (6)$$

Si  $P$  se sustituye por  $Q$ , eliminando  $D_1$  en las ecuaciones (2) y (3), obtenemos

$$N_u^2 Q_u = \frac{QN^2}{H^{3/2}}$$

$$\text{y} \quad N_s = \frac{N\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (\text{para bombas}) \quad (7)$$

donde esta velocidad específica indica la velocidad a la que circularía 1 m<sup>3</sup>/seg bajo 1 m de carga.

Estas son las expresiones comunes para bombas y ruedas de agua. Para rodetes homólogos en los que pueden emplearse diferentes fluidos, véanse las expresiones (9b), (11a) y (12a) al comienzo de este capítulo.

6. Una turbina tangencial desarrolla 7300 CV a 200 rpm bajo una carga de 240 m con un rendimiento del 82 %. (a) Si el factor de velocidad es 0,46, calcular el diámetro de la rueda, el caudal, la velocidad unitaria, el caudal unitario y la velocidad específica. (b) Para esta turbina, ¿cuál será la velocidad, la potencia y el caudal bajo una carga de 161 m? (c) Para una turbina que tenga el mismo diseño, ¿cuál deberá ser el diámetro de la rueda para desarrollar 3850 CV bajo una carga de 180 m y cuál será su velocidad y caudal? Suponer que el rendimiento no varía.

**Solución:**

Teniendo en cuenta las fórmulas del Problema 5, se procede como sigue:

$$(a) \text{ Puesto que } \phi = \frac{D_1 N}{8460\sqrt{240} \times 0,46} = \frac{200}{301,44} \text{ cm}$$

$$\text{De caballos de vapor a la salida} = \frac{wQHe}{75}, \quad Q = \frac{7300 \times 75}{1000 \times 240 \times 0,82} = 2,782 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

$$N_u = \frac{ND_1}{\sqrt{H}} = \frac{200 \times 301,4}{\sqrt{240}} = 3891 \text{ rpm}$$

$$P_u = \frac{P}{D_1^2 H^{3/2}} = \frac{7300}{(301,4)^2 (240)^{3/2}} = 0,0000216 \text{ CV}$$

$$Q_u = \frac{Q}{D_1^2 \sqrt{H}} = \frac{2,782}{(301,4)^2 \sqrt{240}} = 0,000001977 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

$$N_s = \frac{N \sqrt{P}}{H^{5/4}} = \frac{200 \sqrt{7300}}{(240)^{5/4}} = 18,09 \text{ rpm}$$

$$(h) \text{ Velocidad } N = \frac{N_u \sqrt{H}}{D_1} = \frac{3891 \sqrt{161}}{301,4} = 163,8 \text{ rpm.}$$

$$\text{Potencia } P = P_u D_1^2 H^{3/2} = 0,0000216 (301,4)^2 (161)^{3/2} = 4010 \text{ CV.}$$

$$\text{Caudal } Q = Q_u D_1^2 \sqrt{H} = 0,000001977 (301,4)^2 \sqrt{161} = 2,279 \text{ m}^3/\text{seg}$$

Los tres valores anteriores han podido obtenerse observando que, para la misma turbina ( $D_1$  invariable), la velocidad varía como  $H^{1/2}$ , la potencia como  $H^{3/2}$  y  $Q$  como  $H^{1/2}$ . Por consiguiente,

$$N = 200 \sqrt{\frac{161}{240}} = 163,8 \text{ rpm,} \quad P = 7300 \left(\frac{161}{240}\right)^{3/2} = 4010 \text{ CV,} \quad Q = 2,782 \sqrt{\frac{161}{240}} = 2,279 \text{ m}^3/\text{seg}$$

(c) De  $P = P_u D_1^2 H^{3/2}$  obtenemos

$$3850 = 0,0000216 (D_1)^2 (180)^{3/2}, \quad \text{de donde} \quad D_1^2 = 73,807 \quad \text{y} \quad D_1 = 271,7 \text{ cm}$$

$$N = \frac{N_u \sqrt{H}}{D_1} = \frac{3891 \sqrt{180}}{271,7} = 192 \text{ rpm}$$

$$Q = Q_u D_1^2 \sqrt{H} = 0,000001977 (73807) \sqrt{180} = 1,958 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

7. Una turbina desarrolla 144 CV girando a 100 rpm bajo una carga de 8,0 m. (a) ¿Qué potencia desarrollaría bajo una carga de 11,0 m, suponiendo el mismo caudal? (b) ¿A qué velocidad giraría la turbina?

**Solución:**

(a) Potencia desarrollada =  $wQH_c/75$ , de donde  $wQc/75 = CV/H = 144/8$ .

Para el mismo caudal (y rendimiento), bajo la carga de 11 m, obtenemos

$$wQc/75 = 144/8 = CV/11 \quad \text{o} \quad CV = 198$$

$$(b) \quad N_s = \frac{N \sqrt{P}}{H^{5/4}} = \frac{100 \sqrt{144}}{(8)^{5/4}} = 89,19 \text{ rpm}$$

$$\text{Luego} \quad N = \frac{N_s H^{5/4}}{\sqrt{P}} = \frac{89,19 (11)^{5/4}}{\sqrt{198}} = 127 \text{ rpm}$$

8. Una rueda de impulsión a la velocidad óptima produce 125 CV bajo una carga de 64 m. (a) ¿En qué tanto por ciento se incrementaría la velocidad para una carga de 88 m? (b) Suponiendo rendimientos iguales, ¿qué potencia resultaría?

**Solución:**

(a) Para la misma rueda, la velocidad es proporcional a la raíz cuadrada de la altura de carga. Entonces,

$$N_1 \sqrt{H_1} = N_2 \sqrt{H_2} \quad \text{o} \quad N_2 = N_1 \sqrt{H_2/H_1} = N_1 \sqrt{88/64} = 1,1726 N_1$$

La velocidad se incrementaría en un 17,26 %.

(b) Para obtener la nueva potencia producida podemos aplicar la relación de velocidad  $v_1 = v_{ca}$ .

$$\text{De } N_s = \frac{N\sqrt{P}}{H^{5/4}} \text{ tenemos } \frac{N_1\sqrt{125}}{(64)^{5/4}} = \frac{N_2\sqrt{P_2}}{(88)^{5/4}}, \text{ de donde}$$

$$P_2 = \left[ \frac{N_1}{1,1726N_2} \sqrt{125 \left( \frac{88}{64} \right)^{5/4}} \right]^2 = 201,54 \text{ CV}$$

El mismo valor puede obtenerse observando que, para la misma rueda, la potencia varía como  $H^{3/2}$ , dando  $P_2 = 125(88/64)^{3/2} = 201,54 \text{ CV}$ .

9. Hallar el diámetro aproximado y la velocidad angular de una rueda Pelton con un rendimiento del 85 % y una carga efectiva de 67 m, cuando el caudal es de  $0,027 \text{ m}^3/\text{seg}$ . Suponer los valores de  $\phi = 0,46$  y  $c = 0,975$ .

**Solución:**

Para una rueda de impulsión la expresión general de la potencia es

$$P = \frac{wQH_e}{75} = \frac{1000(cA\sqrt{2gH})He}{75} = \frac{1000\pi\sqrt{2g}e}{75 \times 4 \times 10.000} d^2 H^{3/2} = 0,00384d^2 H^{3/2} \quad (1)$$

donde  $d$  = diámetro de boquilla en centímetros y los valores de  $c$  y  $e$  son 0,975 y 0,85, respectivamente.

$$\text{Potencia} = \frac{wQH_e}{75} = \frac{1000 \times 0,027 \times 66 \times 0,85}{75} = 20,5 \text{ CV}$$

Sustituyendo este valor en la expresión (1) anterior obtenemos  $d = 3,12 \text{ cm}$ . (Este mismo valor del diámetro  $d$  puede calcularse también aplicando la ecuación  $Q = cA\sqrt{2gH}$  del Capítulo 9.)

Ahora se establecerá la relación de diámetro de la boquilla a diámetro de la rueda. Esta relación resultará de dividir la velocidad específica por la velocidad unitaria, o sea,

$$\frac{N_s}{N_u} = \frac{N\sqrt{P}}{H^{5/4}}; \quad \frac{ND_1}{\sqrt{H}} = \frac{\sqrt{P} \times \sqrt{H}}{D_1 H^{5/4}}$$

Sustituyendo el valor de  $P$  de la ecuación (1) anterior,

$$\frac{N_s}{N_u} = \frac{\sqrt{0,00384d^2 H^{3/2}} \sqrt{H}}{D_1 H^{5/4}} = 0,062 \frac{d}{D_1}$$

Como  $N_u = 8460\phi$  (véase Problema 5), se tiene

$$N_s = (8460 \times 0,46) \left( 0,062 \frac{d}{D_1} \right) = 241,28 \frac{d}{D_1} \quad (2)$$

Se precisa suponer un valor de  $N_s$  en (2). Empleando  $N_s = 10$ , tenemos

$$10 = \frac{N\sqrt{P}}{H^{5/4}} = \frac{N\sqrt{20,5}}{(67)^{5/4}} \quad \text{o} \quad N = 423 \text{ rpm}$$

La velocidad de una rueda de impulsión debe sincronizarse con la velocidad del generador. Para un generador de 50 ciclos con 8 pares de polos, la velocidad  $N = 6000/(2 \times 8) = 375 \text{ rpm}$ ; y con 7 pares,  $N = 6000/(2 \times 7) = 429 \text{ rpm}$ . Empleando, por ejemplo, el generador de 7 pares de polos, el cálculo da

$$N_s = \frac{429\sqrt{20,5}}{(67)^{5/4}} = 10,133$$

De la ecuación (2) anterior,  $D_1 = 241,28d/N_s = 241,28(3,12)/10,133 = 74,29 \text{ cm}$ .

Para el generador de 7 pares de polos,  $N = 429 \text{ rpm}$ .

10. Las turbinas de reacción en la instalación de la presa del Hoover tienen una capacidad estimada de 116.600 CV a 180 rpm bajo una carga de 148 m. El diámetro de cada turbina es 3,35 m y el caudal es  $66,5 \text{ m}^3/\text{seg}$ . Calcular el factor de velocidad, la velocidad unitaria, el caudal unitario, la potencia unitaria y la velocidad específica.

**Solución:**

Aplicando las ecuaciones (4) a (11) del principio de este Capítulo, obtenemos los valores siguientes:

$$\phi = \frac{D_1 N}{8460 \sqrt{H}} = \frac{(3,35 \times 100)180}{8460 \sqrt{148}} = 0,586$$

$$N_u = \frac{D_1 N}{\sqrt{H}} = \frac{(3,35 \times 100)180}{\sqrt{148}} = 4957 \text{ rpm}$$

$$Q_u = \frac{Q}{D_1^2 \sqrt{H}} = \frac{66,5}{(335)^2 \sqrt{148}} = 0,0000487 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$P_u = \frac{P}{D_1^2 H^{3/2}} = \frac{116.600}{(335)^2 (148)^{3/2}} = 0,000577 \text{ CV}$$

$$N_s = N_u \sqrt{P_u} = 119,1$$

11. Una rueda de impulsión gira a 400 rpm bajo una carga efectiva de 60 m y desarrolla 90 CV al freno. Para valores de  $\phi = 0,46$ ,  $c_v = 0,97$  y rendimiento  $e = 83 \%$ , determinar (a) el diámetro del chorro, (b) el caudal en  $\text{m}^3/\text{seg}$ , (c) el diámetro de la rueda y (d) la altura de presión en la base de la boquilla de 20 cm de diámetro.

**Solución:**

- (a) La velocidad del chorro es  $v = c_v \sqrt{2gh} = 0,97 \sqrt{19,6 \times 60} = 33,264 \text{ m/seg}$ .

Antes de determinarse el caudal para poder calcular el diámetro del chorro.

$$\text{Potencia en CV desarrollada} = wQH_e/75, 90 = 1000Q(60)(0,83)/75 \quad \text{y} \quad Q = 0,137 \text{ m}^3/\text{seg}.$$

$$\text{Entonces, área del chorro} = Q/v = 0,00407 \text{ m}^2 \quad \text{y} \quad \text{diámetro del chorro} = 0,072 \text{ m} = 7,20 \text{ cm}.$$

- (b) Resuelto en (a).

$$(c) \quad \phi = \frac{D_1 N}{8460 \sqrt{H}}, \quad 0,46 = \frac{D_1 (400)}{8460 \sqrt{60}} \quad \text{y} \quad D_1 = 75,36 \text{ cm}$$

- (d) Carga efectiva  $h = (p/w + V^2/2g)$ , donde  $p$  y  $V$  son valores medios de la presión y la velocidad medidas en la base de la boquilla. El valor de  $V_{20} = Q/A_{20} = 4,314 \text{ m/seg}$ .

$$\text{Luego } \frac{p}{w} = h - \frac{V_{20}^2}{2g} = 60 - \frac{(4,314)^2}{2g} = 59,05 \text{ m}.$$

12. Una rueda Pelton desarrolla 6000 CV al freno bajo una carga neta de 120 m a una velocidad de 200 rpm. Suponiendo  $c_v = 0,98$ ,  $\phi = 0,46$ , rendimiento  $= 88 \%$  y la relación diámetro del chorro-diámetro de la rueda igual a  $1/9$ , determinar (a) el caudal requerido, (b) el diámetro de la rueda, (c) el diámetro y el número de chorros requeridos y (d) la velocidad específica.

**Solución:**

$$(a) \text{ Potencia en CV del agua} = wQH/75, 6000/0,88 = 1000Q120/75 \quad \text{y} \quad Q = 4,261 \text{ m}^3/\text{seg}.$$

$$(b) \text{ Velocidad del chorro } v = c_v \sqrt{2gh} = 0,98 \sqrt{19,6(120)} = 47,527 \text{ m/seg}.$$

$$\text{Velocidad periférica } u = \phi \sqrt{2gh} = 0,46 \sqrt{19,6(120)} = 22,309 \text{ m/seg}.$$

$$\text{Luego } u = \pi D N/60, \quad 22,309 = \pi D(200/60) \quad \text{y} \quad D = 2,13 \text{ m}.$$

- (c) Puesto que  $d/D = 1/9$ ,  $d = 2,13/9 = 0,237 \text{ m}$  de diámetro.

$$\text{Número de chorros} = \frac{\text{caudal } Q}{\text{caudal por chorro}} = \frac{Q}{A_{ch} v_{ch}} = \frac{4,261}{\frac{1}{4} \pi (0,237)^2 (47,527)} = 2,03. \text{ Se emplean 2 chorros.}$$

$$(d) \text{ La velocidad específica para las dos boquillas es } N_s = \frac{N \sqrt{P}}{H^{5/4}} = \frac{200 \sqrt{6000}}{(120)^{5/4}} = 39,0.$$

13. En la planta de Pickwick de TVA las turbinas de hélice tienen una potencia de 48.000 CV a 81,8 rpm bajo una carga de 13 m. El diámetro de desagüe es 742,4 cm. Para una turbina geoméricamente semejante que desarrolle 36.000 CV bajo una carga de 11 m, ¿cuáles serán la velocidad y el diámetro? ¿Cuál será el porcentaje de variación del caudal?

**Solución:**

La velocidad específica de turbinas geoméricamente semejantes puede expresarse de la forma

$$N_s = \frac{N\sqrt{P}}{H^{5/4}}. \quad \text{Luego } \frac{81,8\sqrt{48.000}}{(13)^{5/4}} = \frac{N\sqrt{36.000}}{(11)^{5/4}} \quad \text{y} \quad N = 76,6 \text{ rpm}$$

El mismo resultado puede obtenerse calculando  $N_u$ , luego  $P_u$  y  $N_s$ . Estos valores se aplican a la turbina que se va a diseñar. Así, pues,

$$N_u = \frac{D_1 N}{\sqrt{H}} = \frac{742,4(81,8)}{\sqrt{13}} = 16.843$$

$$P_u = \frac{P}{D_1^2 H^{3/2}} = \frac{48.000}{(742,4)^2 (13)^{3/2}} = 0,00186$$

$$N_s = N_u \sqrt{P_u} = 16.843 \sqrt{0,00186} = 726,4$$

$$N = \frac{N_s H^{5/4}}{\sqrt{P}} = \frac{726,4(11)^{5/4}}{\sqrt{36.000}} = 76,6 \text{ rpm, como antes}$$

Para el cálculo del diámetro de la nueva turbina, aplicando  $N_u = \frac{D_1 N}{\sqrt{H}}$ ,  $D_1 = \frac{N_u \sqrt{H}}{N} = \frac{16.843 \sqrt{11}}{76,6} = 729 \text{ cm}$ .

Para hallar el porcentaje de variación del caudal  $Q$ , la relación de caudal para Pickwick y las nuevas turbinas es

$$\text{nueva } \frac{Q}{D_1^2 H^{1/2}} = \text{Pickwick } \frac{Q}{D_1^2 H^{1/2}}, \quad \frac{Q_{\text{Pick}}}{(742,4)^2 (13)^{1/2}} = \frac{Q_{\text{nueva}}}{(729)^2 (11)^{1/2}}$$

y nuevo  $Q = 0,887 Q_{\text{Pick}}$  o aproximadamente un 11 % de reducción de  $Q$ .

14. Un modelo de turbina de 37,5 cm desarrolla 12 CV a una velocidad de 1500 rpm bajo una carga de 7,5 m. Una turbina geoméricamente semejante de 187,5 cm de diámetro trabaja con el mismo rendimiento bajo una carga de 14,7 m. ¿Qué velocidad y potencia se alcanzarán?

**Solución:**

De la expresión (5a) del principio de este capítulo,

$$C_N' = \frac{ND}{\sqrt{gH}} = \text{constante para turbinas homólogas}$$

$$\text{Por consiguiente, modelo } \frac{ND}{\sqrt{gH}} = \text{prototipo } \frac{ND}{\sqrt{gH}}, \quad \frac{1500 \times 37,5}{\sqrt{g \times 7,5}} = \frac{N \times 187,5}{\sqrt{g \times 14,7}} \quad \text{y} \quad N = 420 \text{ rpm.}$$

De la expresión (9a),  $C_P = \frac{P}{D^2 H^{3/2}} = \text{constante. Por tanto,}$

$$\text{modelo } \frac{P}{D^2 H^{3/2}} = \text{prototipo } \frac{P}{D^2 H^{3/2}}, \quad \frac{12}{(37,5)^2 (7,5)^{3/2}} = \frac{P}{(187,5)^2 (14,7)^{3/2}}, \quad P = 823,2 \text{ CV}$$

15. Una turbina de reacción, de 50 cm de diámetro, cuando gira a 600 rpm, desarrolla 261 CV al freno, siendo el caudal de 0,710 m<sup>3</sup>/seg. La altura de presión a la entrada de la turbina es de 27,50 m y la elevación de la carcasa de la turbina sobre el nivel de aguas abajo es de 1,88 m. El agua entra en la turbina con una velocidad de 3,60 m/seg. Calcular (a) la carga efectiva, (b) el rendimiento, (c) la velocidad resultante bajo una carga de 67,50 m y (d) la potencia al freno y el caudal bajo la carga de 67,50 m.

**Solución:**

$$(a) \text{ Carga efectiva } H = \frac{P}{w} + \frac{V^2}{2g} + z = 27,50 + \frac{(3,60)^2}{2g} + 1,88 = 30,0 \text{ m}$$

(b) Potencia suministrada por el agua =  $uQH/75 = 1000(0,710)(30,0)/75 = 284$  CV.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{potencia en el eje}}{\text{potencia suministrada}} = \frac{261}{284} = 91,9\%$$

(c) Para la misma turbina, la relación  $\frac{ND_1}{\sqrt{H}}$  es constante. Luego  $\frac{N \times 50}{\sqrt{67,50}} = \frac{600 \times 50}{\sqrt{30}}$  o  $N = 900$  rpm.

(d) Para la misma turbina, las relaciones  $\frac{P}{D_1^2 H^{3/2}}$  y  $\frac{Q}{D_1^2 \sqrt{H}}$  son también constantes. Luego  $\frac{P}{(50)^2 (67,50)^{3/2}} = \frac{261}{(50)^2 (30)^{3/2}}$ ,  $P = 881$  CV y  $\frac{Q}{(50)^2 \sqrt{67,50}} = \frac{0,710}{(50)^2 \sqrt{30}}$ ,  $Q = 1,065$  m<sup>3</sup>/seg.

16. Un rodete de una bomba de 30 cm de diámetro desagua 0,142 m<sup>3</sup>/seg cuando gira a 1200 rpm. El ángulo  $\beta_2$  del álabe es 160° y el área de salida  $A_2$  es 0,023 m<sup>2</sup>. Suponiendo unas pérdidas de  $2,8(v_2^2/2g)$  y  $0,38(V_2^2/2g)$ , calcular el rendimiento de la bomba (el área de salida se mide normal a  $v_2$ ).

**Solución:**

Las velocidades absoluta y relativa a la salida deben calcularse en primer lugar. Las velocidades  $u_2$  y  $v_2$  son

$$u_2 = r_2 \omega = (15/100)(2\pi \times 1200/60) = 18,850 \text{ m/seg}, \quad v_2 = Q/A_2 = 0,142/0,023 = 6,174 \text{ m/seg}$$

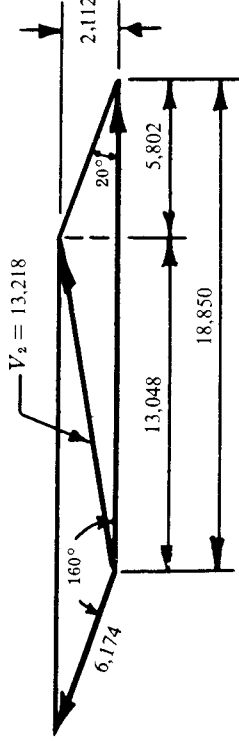


Fig. 12-4

Del diagrama vectorial representado en la Fig. 12-4, el valor de la velocidad absoluta a la salida es  $V_2 = 13,218$  m/seg. Del Problema 4,

$$\text{carga suministrada por la bomba, } H' = \frac{u_2^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} + \frac{V_2^2}{2g} = \frac{(18,850)^2}{2g} - \frac{(6,174)^2}{2g} + \frac{(13,218)^2}{2g} = 25,1 \text{ m}$$

$$\text{Carga cedida al agua, } H = H' - \text{pérdidas} = 25,1 - (2,8 \frac{(6,174)^2}{2g} + 0,38 \frac{(13,218)^2}{2g}) = 16,3 \text{ m.}$$

$$\text{Rendimiento } e = H/H' = 16,3/25,1 = 64,9\%$$

El valor de  $H'$  puede calcularse también mediante la expresión comúnmente usada

$$H' = \frac{u_2}{g}(u_2 + v_2 \cos \beta_2) = \frac{18,850}{g}[18,850 + 6,174(-0,940)] = 25,1 \text{ m}$$

17. Una bomba centrífuga proporciona un caudal de 1000 l/min contra una carga de 15 m cuando la velocidad es de 1500 rpm. El diámetro del rodete impulsor es de 30 cm y la potencia al freno de 6 CV. Una bomba geoméricamente semejante de 35 cm de diámetro gira a razón de 1750 rpm. Suponiendo que los rendimientos son iguales, (a) ¿qué carga desarrollará? (b) ¿Cuánta agua bombeará y (c) ¿qué potencia al freno desarrollará?

**Solución:**

(a) Las relaciones de velocidad,  $\frac{DN}{\sqrt{H}}$ , para el modelo y prototipo son iguales. Luego

$$\frac{30 \times 1500}{\sqrt{15}} = \frac{35 \times 1750}{\sqrt{H}} \quad \text{y} \quad H = 27,789 \text{ m}$$



(b) Las relaciones de caudal  $\frac{Q}{D^2\sqrt{H}}$  son iguales. Luego

$$\frac{1000}{(30)^2\sqrt{15}} = \frac{Q}{(35)^2\sqrt{27.789}} \quad \text{y} \quad Q = 1852.6 \text{ l/min}$$

Otra relación de caudal muy empleada es  $\frac{Q}{D^3N} = \text{constante}$ , de la cual

$$\frac{Q}{(35)^3(1750)} = \frac{1000}{(30)^3(1500)} \quad \text{y} \quad Q = 1852.6 \text{ l/min}$$

(c) La relación de potencia,  $\frac{P}{D^5N^3} = \text{constante}$ , puede aplicarse para el modelo y el prototipo. Luego

$$\frac{P}{(35)^5(1750)^3} = \frac{6}{(30)^5(1500)^3} \quad \text{y} \quad P = 20,593 \text{ CV}$$

- 18.** Una bomba de 15 cm de diámetro suministra 5200 l/min contra una altura de carga de 22,5 m cuando gira a 1750 rpm. En la Fig. 12-5 se representan las curvas altura de carga-caudal y rendimiento-caudal. Para una bomba de 20 cm geoméricamente semejante girando a 1450 rpm y suministrando 7200 l/min, determinar (a) la altura de carga probable desarrollada por la bomba de 20 cm. (b) Suponiendo una curva de rendimiento semejante para la bomba de 20 cm, ¿qué potencia será requerida para tener el caudal de 7200 l/min?

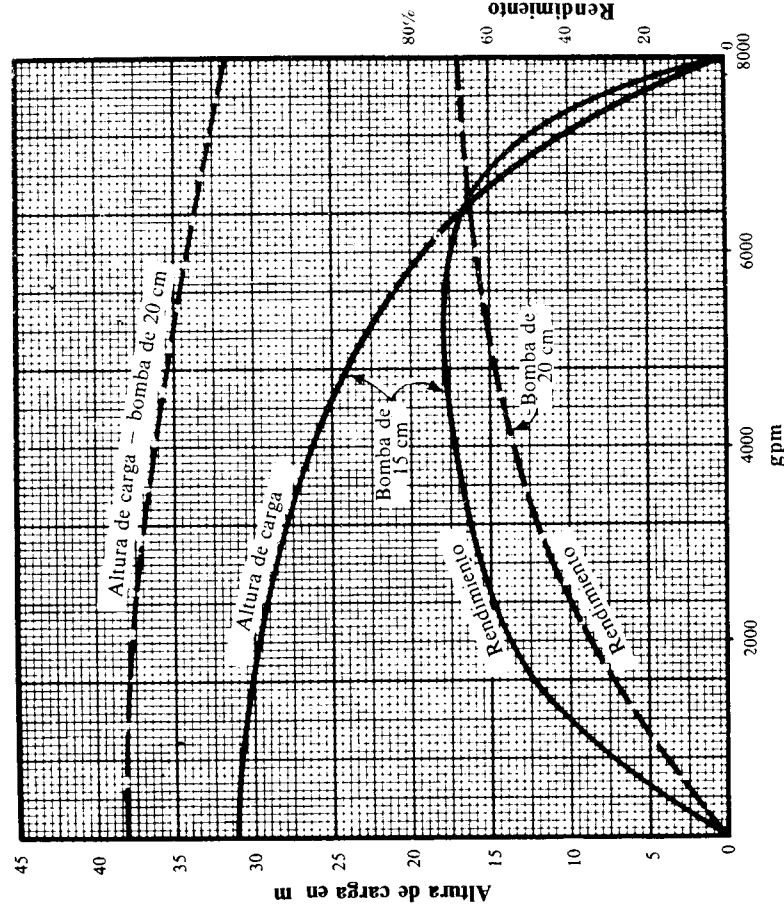


Fig. 12-5

**Solución:**

- (a) Las bombas homólogas tendrán idénticas características a caudales correspondientes. Se eligen varios caudales para la bomba de 15 cm y se leen las correspondientes alturas de carga. Se calculan los valores de  $H$  y  $Q$  de manera que pueda representarse una curva para la bomba de 20 cm. Uno de tales cálculos se detalla a continuación y se establece una tabla de valores para cálculos semejantes.

Empleando el caudal dado de 5200 l/min y los 22.5 de carga, obtenemos de la relación de velocidad,

$$H_{20} = (D_{20}/D_{15})^2(N_{20}/N_{15})^2H_{15} = (20/15)^2(1450/1750)^2H_{15} = 1.221H_{15} = 1.221(22.5) = 27.5 \text{ m}$$

De la relación de caudal,  $\frac{Q}{D^3N} = \text{constante}$ , obtenemos

$$Q_{20} = (D_{20}/D_{15})^3(N_{20}/N_{15})Q_{15} = (20/15)^3(1450/1750)Q_{15} = 1.964Q_{15} = 1.964(5200) = 10.213 \text{ l/min}$$

Se han obtenido los siguientes valores adicionales que han servido para representar la curva a trazos de la Figura 12-5.

#### Bomba de 15 cm a 1750 rpm

| Q en l/min | H en m | Rendimiento |
|------------|--------|-------------|
| 0          | 31.0   | 4           |
| 2000       | 29.5   | 54 %        |
| 3200       | 28.0   | 64 %        |
| 4000       | 26.0   | 68 %        |
| 5200       | 22.5   | 70 %        |
| 6400       | 17.0   | 67 %        |

#### Bomba de 20 cm a 1450 rpm

| Q en l/min | H en m | Rendimiento |
|------------|--------|-------------|
| 0          | 37.8   | 0           |
| 3928       | 36.0   | 54 %        |
| 6285       | 34.2   | 64 %        |
| 7856       | 31.7   | 68 %        |
| 10213      | 27.5   | 70 %        |
| 12570      | 20.7   | 67 %        |

De la curva altura de carga-caudal, para  $Q = 7200 \text{ l/min}$  la altura de carga es 32.5 m.

- (b) El rendimiento de la bomba de 20 cm sería probablemente algo mayor que el de la bomba de 15 cm para relaciones comparables de caudal. En este caso, la hipótesis es que las curvas de rendimiento son las mismas para relaciones de caudal comparables. La tabla anterior da los valores para los caudales indicados. La figura representa la curva de rendimiento para la bomba de 20 cm y, para los 7200 l/min, el valor del rendimiento es de 67 %. Luego

$$P = \frac{\omega Q H}{75\epsilon} = \frac{1000[7200/(60 \times 1000)](32.5)}{75(0.67)} = 77.6 \text{ CV}$$

19. Hay que suministrar 1225 l/min contra una carga de 126 m a 3600 rpm. Suponiendo un rendimiento aceptable de la bomba a velocidades específicas del rodete impulsor comprendidas entre 6000 y 19 000 rpm cuando el caudal  $Q$  se expresa en l/min, ¿cuántas etapas de bombeo se necesitarán?

#### Solución:

Para 1 etapa,  $N_s = \frac{N\sqrt{Q}}{H^{3/4}} = \frac{3600\sqrt{1225}}{(126)^{3/4}} = 3350$ . Este valor es demasiado bajo.

Si se toman 3 etapas, entonces la carga/etapa =  $126/3 = 42 \text{ m}$  y  $N_s = \frac{3600\sqrt{1225}}{(42)^{3/4}} = 7640$ .

Comparamos este valor con el valor para 4 etapas, para el cual  $H = 126/4 = 31.5 \text{ m}$ , o sea, con

$$N_s = \frac{3600\sqrt{1225}}{(31.5)^{3/4}} = 9480$$

Esta última velocidad específica parece atractiva. Sin embargo, en la práctica, el costo adicional de la bomba de 4 etapas puede tener más importancia que el aumento del rendimiento de la unidad. Deberá realizarse un estudio económico de los costes.

20. A fin de predecir el comportamiento de una pequeña bomba de aceite, se realizan ensayos sobre un modelo que emplea aire. La bomba de aceite va a ser arrastrada por un motor de 1/20 CV a 1800 rpm y para la bomba de aire se dispone de un motor de 1/4 CV que gira a 600 rpm. Empleando como densidad relativa del aceite 0.912 y como densidad del aire (constante) 1.227 kg masa/m<sup>3</sup>, ¿cuál será la dimensión del modelo?

#### Solución:

Aplicando la relación de potencia, obtenemos prototipo  $\frac{P}{\rho D^5 N^3} = \text{modelo } \frac{P}{\rho D^5 N^3}$ .

$$\text{Luego } \frac{1/20}{0.912(1000)D_p^5(1800)^3} = \frac{1/4}{1.227D_m^5(600)^3} \quad \text{y} \quad \frac{D_m}{D_p} = 10$$

El modelo será 10 veces mayor que la bomba de aceite.

21. Una bomba, girando a 1750 rpm, tiene una curva altura de carga-caudal como la representada en la Fig. 12-6. La bomba impulsa agua a través de una tubería de 15 cm de diámetro y 450 m de largo, con  $f = 0,025$ . La carga estática es 10,0 m y las pérdidas menores pueden despreciarse. Calcular el caudal y la altura de carga de la bomba en estas condiciones.

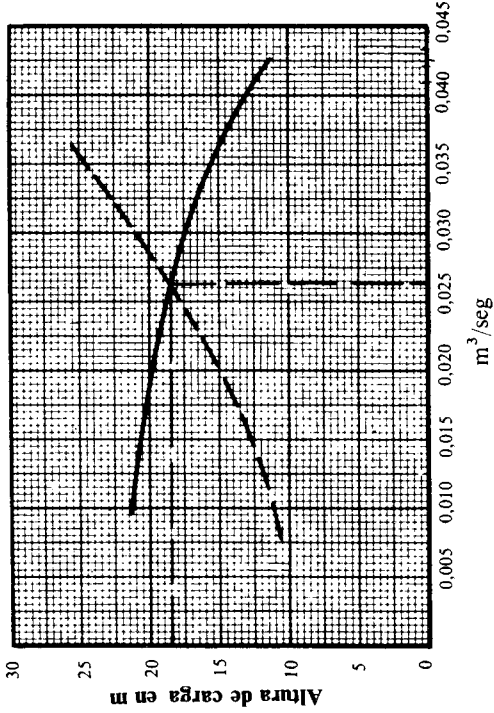


Fig. 12-6

**Solución:**

La pérdida de carga a través de la tubería aumenta con el caudal. Puede dibujarse una curva que represente la altura de carga total de bombeo en función del caudal (curva a trazos). Pero altura de carga total de la bomba = carga estática + pérdidas en tubería

$$= 10,0 + 0,025 \left( \frac{450}{0,15} \right) \frac{V^2}{2g} = 10,0 + 75,0 \frac{V^2}{2g}$$

Podemos calcular esta altura de la manera siguiente:

$$Q = 0,010 \quad 0,015 \quad 0,020 \quad 0,025 \quad 0,030 \quad 0,035 \quad 0,040 \quad 0,045$$

$$V = \frac{Q}{A} = 0,566 \quad 0,849 \quad 1,132 \quad 1,415 \quad 1,698 \quad 1,981 \quad 2,264 \quad 2,547$$

$$75V^2/2g = 1,226 \quad 2,758 \quad 4,903 \quad 7,662 \quad 11,033 \quad 14,903 \quad 19,226 \quad 24,055$$

$$\text{Altura total} = 11,226 \quad 12,758 \quad 14,903 \quad 17,662 \quad 21,033 \quad 24,903 \quad 29,226 \quad 33,055$$

La Fig. 12-6 indica que cuando el caudal es  $0,0265 \text{ m}^3/\text{seg}$  la altura desarrollada por la bomba será igual a la altura total de bombeo, es decir, 18,5 m.

Para el cálculo económico de las dimensiones de la tubería, véase Capítulo 8, Problema 18.

22. ¿Cuál es la relación de potencia de una bomba y su modelo a escala  $1/5$  si la relación de alturas es 4 a 1?

**Solución:**

Para bombas geoméricamente semejantes,  $\frac{P}{D^2 H^{3/2}}$  para la bomba =  $\frac{P}{D^2 H^{3/2}}$  para el modelo. Entonces,

$$\frac{P_b}{(5D)^2 (4H)^{3/2}} = \frac{P_m}{D^2 H^{3/2}} \quad \text{y} \quad P_b = 25(4)^{3/2} P_m = 200 P_m$$

23. Desarrollar las expresiones que dan el empuje y la potencia de salida de una hélice, la velocidad a través de la hélice y el rendimiento de la hélice.

**Solución:**

(a) Aplicando el principio de la cantidad de movimiento, el empuje  $F$  de la hélice varía la cantidad de movimiento de la masa  $M$  de aire de la Fig. 12-7. La hélice puede estar fija en un fluido que se mueve con velocidad de aproximación  $V_1$  o puede moverse hacia la izquierda, a velocidad  $V_1$  en el fluido en reposo. Así, pues, despreciando los vórtices y el rozamiento,

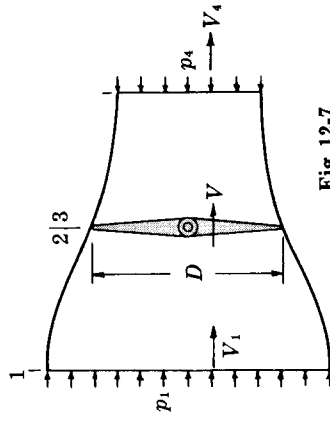


Fig. 12-7

$$\text{Empuje } F = \frac{wQ}{g} (\Delta V) = \frac{wQ}{g} (V_4 - V_1) \quad (1a)$$

$$= \frac{w}{g} \left( \frac{1}{4} \pi D^3 V \right) (V_4 - V_1) \quad (1b)$$

(b) La potencia de salida es simplemente  $P = \text{fuerza de empuje} \times \text{velocidad}$

$$= \frac{wQ}{g} (V_4 - V_1) V_1 \quad (2)$$

(c) El empuje  $F$  es también igual a  $(p_3 - p_2) \left( \frac{1}{4} \pi D^2 \right)$ . Por tanto, de (1b),

$$p_3 - p_2 = \frac{w}{g} V (V_4 - V_1) \quad (3)$$

Aplicando el principio del trabajo y la energía cinética, tomando como unidad  $1 \text{ m}^3$  y suponiendo que no existen pérdidas de carga, se tiene

Energía cinética inicial/ $\text{m}^3$  + trabajo realizado/ $\text{m}^3$  = energía cinética final/ $\text{m}^3$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} (w/g) V_1^2 + (p_3 - p_2) &= \frac{1}{2} (w/g) V_4^2 \\ p_3 - p_2 &= \frac{w}{g} \left( \frac{V_4^2 - V_1^2}{2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Puede obtenerse el mismo resultado aplicando la ecuación de Bernoulli entre 1 y 2, y 3 y 4 y despejando  $(p_3 - p_2)$ . Obsérvese que  $(p_3 - p_2)$  viene dado en  $\text{kg/m}^2 \times \text{m/m}$  o  $\text{kg/m}^3$ .

Iguando (3) y (4),

$$V = \frac{V_1 + V_4}{2} = \frac{V_1 + (V_1 + \Delta V)}{2} = V_1 + \frac{\Delta V}{2} \quad (5)$$

indicando que la velocidad a través de la hélice es la media de las velocidades delante y detrás de la hélice.

El caudal de fluido  $Q$  puede expresarse en función de esta velocidad  $V$ , o sea,

$$Q = AV = \frac{1}{4} \pi D^2 V = \frac{1}{4} \pi D^2 \left( \frac{V_1 + V_4}{2} \right) \quad (6a)$$

$$\text{o} \quad Q = \frac{1}{4} \pi D^2 (V_1 + \frac{1}{2} \Delta V) \quad (6b)$$

(d) El rendimiento de la hélice es

$$e = \frac{\text{potencia de salida}}{\text{potencia de entrada}} = \frac{(wQ/g)(V_4 - V_1)V_1}{\frac{1}{2} (wQ/g)(V_4^2 - V_1^2)} = \frac{2V_1}{V_4 + V_1} = \frac{V_1}{V} \quad (7)$$

representando el denominador la variación de la energía cinética creada por la potencia de entrada.

**24.** Un modelo de hélice, de 36 cm de diámetro, desarrolla un empuje de 22 kg a una velocidad de 3 m/seg en el agua. (a) ¿Qué empuje desarrollaría una hélice semejante de 180 cm a la misma velocidad en el agua? (b) ¿Y a la velocidad de 6 m/seg? (c) ¿Cuál sería la velocidad en la estela en (b)?

**Solución:**

(a) Velocidad lineal  $V = r\omega$  o varía como  $DN$ . Luego podemos escribir

$$V_m \propto 36N_m \quad \text{y} \quad V_p \propto 180N_p$$

Puesto que las velocidades son iguales,  $36N_m = 180N_p$ .

Empleando la expresión del coeficiente de empuje, ecuación (19), obtenemos

$$\frac{F}{\rho N^2 D^4} \text{ modelo} = \frac{F}{\rho N^2 D^4} \text{ prototipo}, \quad \frac{22}{\rho \left(\frac{180}{36} N_p\right)^2 (36)^4} = \frac{F}{\rho (N_p)^2 (180)^4}, \quad F = 550 \text{ kg}$$

En la ecuación (19) el diámetro  $D$  está en m y  $N$  en revoluciones por segundo. Sin embargo, cuando las relaciones se igualan entre sí, en tanto se empleen las mismas unidades en cada relación (m/m, cm/cm, rpm/rpm), se llega a una solución correcta.

(b) En este caso  $V_m \propto 36 N_m$  y  $(2V_m = V_p) \propto 180 N_p$ . Estos valores dan  $72 N_m = 180 N_p$ . Luego

$$\frac{22}{\rho \left(\frac{180}{72} N_p\right)^2 (36)^4} = \frac{F}{\rho N_p^2 (180)^4} \quad \text{y} \quad F = 2200 \text{ kg}$$

*Nota:* La relación anterior velocidad lineal-velocidad angular-diámetro puede escribirse de la forma

$$\frac{V}{ND} \text{ para modelo} = \frac{V}{ND} \text{ para prototipo} \quad (1)$$

Esta relación se llama relación avance-diámetro puesto que  $V/N$  es el recorrido de avance de la hélice en una revolución.

(c) La velocidad en la estela (o cambio de velocidad) puede obtenerse resolviendo la ecuación (6b) del problema anterior para  $\Delta V$  una vez sustituido  $Q$  por  $\frac{F}{\rho \Delta V}$  [de la ecuación (1a)]. Luego

$$\frac{F}{\rho \Delta V} = \left(\frac{1}{4}\pi D^2 V_1 + \left(\frac{1}{4}\pi D^2\right)\left(\frac{1}{2}\Delta V\right)\right) \quad \text{y} \quad (\Delta V)^2 + 2V_1 \Delta V - \frac{8F}{\rho \pi D^2} = 0$$

Despejando  $\Delta V$  y tomando la raíz real se tiene

$$\Delta V = -V_1 + \sqrt{V_1^2 + \frac{8F}{\rho \pi D^2}} \quad (2)$$

Con los valores anteriores, tomando  $D$  en m,

$$\Delta V = -6,0 + \sqrt{(6,0)^2 + \frac{8 \times 2200}{(1000/9,8)\pi(1,8)^2}} = 1,28 \text{ m/seg} \quad \text{o} \quad V_4 = 7,28 \text{ m/seg}$$

25. Determinar el coeficiente de empuje de una hélice de 10 cm de diámetro que gira a 1800 rpm y des-arrolla un empuje de 1,25 kg en agua dulce.

**Solución:**

$$\text{Coeficiente de empuje} = \frac{F}{\rho N^2 D^4} = \frac{1,25}{(1000/9,8)(1800/60)^2(0,1)^4} = 0,136.$$

El coeficiente es adimensional cuando  $F$  viene dado en kg,  $N$  en revoluciones/seg y  $D$  en m.

26. Los coeficientes de potencia y de empuje de una hélice de 2,4 m de diámetro, moviéndose hacia adelante a 30 m/seg con una velocidad de giro de 2400 rpm, son 0,068 y 0,095, respectivamente. (a) Determinar la potencia requerida y el empuje en aire ( $\rho = 0,125 \text{ UTM/m}^3$ ). (b) Si la relación avance-diámetro para el rendimiento máximo es 0,70, ¿cuál es la velocidad del aire para el rendimiento máximo?

**Solución:**

$$(a) \text{ Potencia } P = C_p \rho N^3 D^5 \text{ en m kg/seg} = \frac{0,068(0,125)(2400/60)^3(2,4)^5}{75} = 578 \text{ CV.}$$

$$\text{Empuje } F = C_F \rho N^2 D^4 \text{ en kg} = 0,095(0,125)(2400/60)^2(2,4)^4 = 630 \text{ kg.}$$

$$(b) \text{ Puesto que } V/ND = 0,70, \quad V = 0,70(2400/60)(2,4) = 67,2 \text{ m/seg.}$$

27. Un avión vuela a 290 km/h en aire tranquilo,  $w = 1,200 \text{ kg/m}^3$ . La hélice tiene 1,70 m de diámetro y la velocidad del aire a través de la hélice es de 97 m/seg. Determinar (a) la velocidad en la estela, (b) el empuje, (c) la potencia de entrada, (d) la potencia de salida, (e) el rendimiento y (f) la diferencia de presión a través de la hélice.

**Solución:**

Aplicando las expresiones desarrolladas en el Problema 23 anterior, obtenemos, de (5),

$$(a) \quad V = \frac{1}{2}(V_1 + V_4), \quad 97 = \frac{1}{2}[290(1000/3600) + V_4], \quad V_4 = 113,4 \text{ m/seg (relativa al fuselaje)}.$$

$$(b) \quad \text{Empuje } F = \frac{w}{g}(V_4 - V_1) = \frac{1,200}{9,8}[\frac{1}{4}\pi(1,70)^2(97)](113,4 - 80,6) = 884 \text{ kg}.$$

$$(c) \quad \text{Potencia de entrada } P_e = FV/75 = 884(97)/75 = 1143 \text{ CV}.$$

$$(d) \quad \text{Potencia de salida } P_s = FV_1/75 = 884(80,6)/75 = 950 \text{ CV}.$$

$$(e) \quad \text{Rendimiento } e = 950/1143 = 83,1 \%$$

$$\text{o. de la ecuación (7) del Problema 23,} \quad e = \frac{2V_1}{V_4 + V_1} = \frac{2(80,6)}{113,4 + 80,6} = 83,1 \%$$

$$(f) \quad \text{Diferencia de presión} = \frac{\text{empuje } F}{\text{área } (\frac{1}{4}\pi D^2)} = \frac{884}{\frac{1}{4}\pi(1,7)^2} = 389 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{o. de la ecuación (4) del Problema 23, diferencia de presión} = \frac{1,200}{8,8} \left( \frac{(113,4)^2}{2} - (80,6)^2 \right) = 389 \text{ kg/m}^2.$$

## Problemas propuestos

28. Una rueda de impulsión trabaja bajo una carga efectiva de 190 m. El diámetro del chorro es 10 cm. Para valores de  $\phi = 0,45$ ,  $c_v = 0,98$ ,  $\beta = 160^\circ$  y  $v_2 = 0,85(V_1 - u)$ . Calcular la potencia en el eje. *Sol.* 972 CV
29. Una rueda de impulsión desarrolla 2500 CV bajo una carga efectiva de 274 m. El diámetro de la boquilla es de 12,50 cm,  $c_v = 0,98$ ,  $\phi = 0,46$  y  $D/d = 10$ . Calcular el rendimiento y la velocidad de giro. *Sol.* 77,7 %, 515 rpm
30. Un modelo de turbina, construido a escala 1 : 5, se ha proyectado para desarrollar 4,25 CV al freno a una velocidad de 400 rpm bajo una carga de 1,80 m. Suponiendo rendimientos equivalentes y bajo una carga de 9 m, ¿cuáles serán la velocidad y la potencia de la turbina a escala normal? *Sol.* 178,9 rpm, 1188 CV
31. Determinar el diámetro de la rueda de impulsión y su velocidad de giro a partir de los datos siguientes:  $\phi = 0,46$ ,  $e = 82 \%$ ,  $c_v = 0,98$ ,  $D/d = 12$ , carga = 400 m y potencia cedida = 4800 CV. *Sol.* 152,4 cm, 510,4 rpm
32. Una turbina de reacción girando a velocidad óptima produce 34 CV al freno a 620 rpm bajo una carga de 30 m. Si el rendimiento es del 70,0 % y la relación de velocidad  $\phi = 0,75$ , determinar (a) el diámetro de la rueda, (b) el caudal en  $\text{m}^3/\text{seg}$ , (c) la velocidad característica  $N_s$  y (d) la potencia al freno y el caudal para una carga de 60 m. *Sol.* 56,1 cm, 0,121  $\text{m}^3/\text{seg}$ , 51,49 rpm, 96,2 CV y 0,171 CV
33. En condiciones de máximo rendimiento una turbina de 125 cm de diámetro desarrolla 300 CV bajo una carga de 4,5 m y a 95 rpm. ¿A qué velocidad giraría una turbina homóloga de 62,5 cm de diámetro si trabaja bajo una carga de 7,5 m? ¿Qué potencia desarrollaría? *Sol.* 245,3 rpm, 101,4 CV

34. Una turbina de impulsión de 150 cm de diámetro desarrolla 625 CV al freno cuando trabaja a 360 rpm bajo una carga de 120 m. (a) ¿Bajo qué carga trabajaría una turbina semejante a la misma velocidad a fin de desarrollar 2500 CV al freno? (b) Para la carga calculada, ¿qué diámetro debería emplearse? Sol. 208,8 m, 197,9 cm
35. La relación de velocidad  $\phi$  de una turbina es 0,70 y la velocidad específica es 90. Determinar el diámetro de la turbina para que la potencia sea 2500 CV con una carga de 100 m. Sol. 104 cm
36. De un ensayo sobre una turbina se sacan los siguientes datos: potencia al freno = 22,5 CV, carga = 4,80 m,  $N = 140$  rpm, diámetro de la turbina 90 cm y  $Q = 0,380$  m<sup>3</sup>/seg. Calcular la potencia de entrada, el rendimiento, la relación de velocidad y la velocidad específica. Sol. 24,32 CV, 92,5 %, 0,70, 96,25
37. Una bomba centrífuga gira a 600 rpm. Se dan los siguientes datos:  $r_1 = 5$  cm,  $r_2 = 20$  cm,  $A_1$  (radial) =  $75\pi$  cm<sup>2</sup>,  $A_2$  (radial) =  $180\pi$  cm<sup>2</sup>,  $\beta_1 = 135^\circ$ ,  $\beta_2 = 120^\circ$ , flujo radial a la entrada de los álabes. Despreciando el rozamiento, calcular las velocidades relativas a la entrada y a la salida y la potencia transmitida al agua. Sol. 4,443 m/seg, 1,451 m/seg, 14,4 CV
38. ¿Cuál será el diámetro de una bomba centrífuga que gira a 750 rpm y bombea 0,250 m<sup>3</sup>/seg contra una carga de 9 m? Emplear  $C_N = 80$ . Sol. 32 cm
39. Una bomba centrífuga suministra 0,070 m<sup>3</sup>/seg contra una altura de carga de 7,50 m a 1450 rpm y requiere una potencia de 9,0 CV. Si se reduce la velocidad a 1200 rpm, calcular el caudal, altura y potencia, suponiendo el mismo rendimiento. Sol. 0,058 m<sup>3</sup>/seg, 5,14 m, 5,1 CV
40. Una hélice de 200 cm de diámetro gira a 1200 rpm en una corriente de aire que se mueve a 40 m/seg. Las pruebas realizadas indican un empuje de 325 kg y una potencia absorbida de 220 CV. Calcular, para una densidad del aire de 0,125 UTM/m<sup>3</sup>, los coeficientes de empuje y potencia. Sol. 0,406, 0,516
41. Una hélice de 1,50 m de diámetro se mueve en agua a 9 m/seg y desarrolla un empuje de 1600 kg. ¿Cuál es el aumento en la velocidad de la estela? Sol. 0,937 m/seg
42. Una hélice de 20 cm desarrolla un empuje de 7,20 kg a 140 rpm y una velocidad del agua de 3,6 m/seg. Para una hélice semejante de un barco que se mueve a 7,2 m/seg, ¿qué dimensión deberá tener la hélice para que desarrolle un empuje de 18.000 kg? ¿A qué velocidad deberá girar la hélice? Sol. 500 cm, 11,2 rpm
43. En una chimenea de ventilación un ventilador produce una velocidad de aire de 25 m/seg cuando gira a 1200 rpm. (a) ¿Qué velocidad producirá si el ventilador gira a 1750 rpm? (b) Si un motor de 3,25 CV arrastra al ventilador a 1200 rpm, ¿qué potencia deberá tener el motor para llevar al ventilador a 1750 rpm? Sol. 36,458 m/seg, 10,08 CV
44. Para suministrar 2500 m<sup>3</sup>/min de aire a un túnel de ventilación, ¿qué potencia deberá tener el motor de un ventilador si las pérdidas en el túnel son 14,4 cm de agua y si el rendimiento del ventilador es del 68 %? Emplear  $w_{\text{aire}} = 1,200$  kg/m<sup>3</sup>. Sol. 117,65 CV
45. Una hélice de 3 m de diámetro se mueve a través del aire,  $w = 1,222$  kg/m<sup>3</sup>, a 90 m/seg. Si se suministran 1200 CV a la hélice, ¿qué empuje desarrollará y cuál será el rendimiento de la hélice? Sol. 941,5 kg, 94,15 %

## **APENDICES**

### **Tablas y diagramas**



TABLA 1

## (A) PROPIEDADES APROXIMADAS DE ALGUNOS GASES

| Gas                 | Peso específico $w$<br>a 20° C, 1 Atm.<br>kg/m <sup>3</sup> | Constante $R$ del gas<br>m/°K | Exponente<br>adiabático $k$ | Viscosidad cinemática $\nu$<br>a 20° C, 1 Atm.<br>m <sup>2</sup> /seg |
|---------------------|---|-------------------------------|-----------------------------|---|
| Aire                | 1,2047  | 29,3                          | 1,40                        | $1,488 \times 10^{-5}$  |
| Amoniaco            | 0,7177  | 49,2                          | 1,32                        | 1,535   |
| Anhidrido carbónico | 1,8359  | 19,2                          | 1,30                        | 0,846   |
| Metano              | 0,6664  | 53,0                          | 1,32                        | 1,795   |
| Nitrógeno           | 1,1631  | 30,3                          | 1,40                        | 1,590   |
| Oxígeno             | 1,3297  | 26,6                          | 1,40                        | 1,590   |
| Anhidrido sulfuroso | 2,7154  | 13,0                          | 1,26                        | 0,521   |

## (B) ALGUNAS PROPIEDADES DEL AIRE A LA PRESION ATMOSFERICA

| Temperatura<br>°C | Densidad<br>UTM/m <sup>3</sup> | Peso específico<br>kg/m <sup>3</sup> | Viscosidad dinámica<br>$\mu$<br>kg seg/m <sup>2</sup> | Viscosidad cinemática $\nu$<br>m <sup>2</sup> /seg | Viscosidad dinámica $\mu$<br>kg seg/m <sup>2</sup> |
|-------------------|--------------------------------|--------------------------------------|---|--|--|
| -20               | 0,1424                         | 1,3955                               |   | $1,188 \times 10^{-5}$                             | $16,917 \times 10^{-7}$                            |
| -10               | 0,1370                         | 1,3426                               |   | 1,233  | 16,892   |
| 0                 | 0,1319                         | 1,2926                               |   | 1,320  | 17,411   |
| 10                | 0,1273                         | 1,2475                               |   | 1,415  | 18,013   |
| 20                | 0,1229                         | 1,2047                               |   | 1,488  | 18,288   |
| 30                | 0,1188                         | 1,1642                               |   | 1,600  | 19,008   |
| 40                | 0,1150                         | 1,1270                               |   | 1,688  | 19,412   |
| 50                | 0,1115                         | 1,0927                               |   | $1,769 \times 10^{-5}$                             | $19,724 \times 10^{-7}$                            |

## (C) PROPIEDADES MECANICAS DEL AGUA A LA PRESION ATMOSFERICA

| Temp.<br>°C | Densidad<br>UTM/m <sup>3</sup> | Peso específico<br>kg/m <sup>3</sup> | Viscosidad<br>dinámica<br>kg seg/m <sup>2</sup> | Tensión<br>superficial<br>kg/m | Presión<br>de vapor<br>kg/cm <sup>2</sup> (ab) | Módulo de<br>elasticidad<br>volumétrico<br>kg/cm <sup>2</sup> |
|-------------|--------------------------------|--------------------------------------|---|--------------------------------|--|---|
| 0           | 101,96                         | 999,87                               | $18,27 \times 10^{-5}$                          | 0,00771                        | 0,0056   | 20200   |
| 5           | 101,97                         | 999,99                               | 15,50   | 0,00764                        | 0,0088   | 20900   |
| 10          | 101,95                         | 999,73                               | 13,34   | 0,00756                        | 0,0120   | 21500   |
| 15          | 101,88                         | 999,12                               | 11,63   | 0,00751                        | 0,0176   | 22000   |
| 20          | 101,79                         | 998,23                               | 10,25   | 0,00738                        | 0,0239   | 22400   |
| 25          | 101,67                         | 997,07                               | 9,12  | 0,00735                        | 0,0327   | 22800   |
| 30          | 101,53                         | 995,68                               | 8,17  | 0,00728                        | 0,0439   | 23100   |
| 35          | 101,37                         | 994,11                               | 7,37  | 0,00718                        | 0,0401   | 23200   |
| 40          | 101,18                         | 992,25                               | 6,69  | 0,00711                        | 0,0780   | 23300   |
| 50          | 100,76                         | 988,07                               | $5,60 \times 10^{-5}$                           | 0,00693                        | 0,1249   | 23400   |

TABLA 2

DENSIDAD RELATIVA Y VISCOSIDAD CINEMATICA DE ALGUNOS LIQUIDOS

(Viscosidad cinemática = valor de la tabla  $\times 10^{-6}$ )

| Temp.<br>°C | Agua**         |                                  | Disolvente comercial |                                  | Tetracloruro de carbono |                                  | Aceite lubricante medio |                                    |
|-------------|----------------|----------------------------------|----------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------|------------------------------------|
|             | Densid. relat. | Visc. cinem. m <sup>2</sup> /seg | Densid. relat.       | Visc. cinem. m <sup>2</sup> /seg | Densid. relat.          | Visc. cinem. m <sup>2</sup> /seg | Densid. relat.          | Viscos. cinem. m <sup>2</sup> /seg |
| 5           | 1,000          | 1,520                            | 0,728                | 1,476                            | 1,620                   | 0,763                            | 0,905                   | 471                                |
| 10          | 1,000          | 1,308                            | 0,725                | 1,376                            | 1,608                   | 0,696                            | 0,900                   | 260                                |
| 15          | 0,999          | 1,142                            | 0,721                | 1,301                            | 1,595                   | 0,655                            | 0,896                   | 186                                |
| 20          | 0,998          | 1,007                            | 0,718                | 1,189                            | 1,584                   | 0,612                            | 0,893                   | 122                                |
| 25          | 0,997          | 0,897                            | 0,714                | 1,101                            | 1,572                   | 0,572                            | 0,890                   | 92                                 |
| 30          | 0,995          | 0,804                            | 0,710                | 1,049                            | 1,558                   | 0,531                            | 0,886                   | 71                                 |
| 35          | 0,993          | 0,727                            | 0,706                | 0,984                            | 1,544                   | 0,504                            | 0,883                   | 54,9                               |
| 40          | 0,991          | 0,661                            | 0,703                | 0,932                            | 1,522                   | 0,482                            | 0,875                   | 39,4                               |
| 50          | 0,990          | 0,556                            |                      |                                  |                         |                                  | 0,866                   | 25,7                               |
| 65          | 0,980          | 0,442                            |                      |                                  |                         |                                  | 0,865                   | 15,4                               |

| Temp.<br>°C | Aceite a prueba de polvo* |                                  | Fuel-oil medio* |                                  | Fuel-oil pesado* |                                  | Gasolina*      |                                  |
|-------------|---------------------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|
|             | Densid. relat.            | Visc. cinem. m <sup>2</sup> /seg | Densid. relat.  | Visc. cinem. m <sup>2</sup> /seg | Densid. relat.   | Visc. cinem. m <sup>2</sup> /seg | Densid. relat. | Visc. cinem. m <sup>2</sup> /seg |
| 5           | 0,917                     | 72,9                             | 0,865           | 6,01                             | 0,918            | 400                              | 0,737          | 0,749                            |
| 10          | 0,913                     | 52,4                             | 0,861           | 5,16                             | 0,915            | 290                              | 0,733          | 0,710                            |
| 15          | 0,910                     | 39,0                             | 0,857           | 4,47                             | 0,912            | 201                              | 0,729          | 0,683                            |
| 20          | 0,906                     | 29,7                             | 0,855           | 3,94                             | 0,909            | 156                              | 0,725          | 0,648                            |
| 25          | 0,903                     | 23,1                             | 0,852           | 3,44                             | 0,906            | 118                              | 0,721          | 0,625                            |
| 30          | 0,900                     | 18,5                             | 0,849           | 3,11                             | 0,904            | 89                               | 0,717          | 0,595                            |
| 35          | 0,897                     | 15,2                             | 0,846           | 2,77                             | 0,901            | 67,9                             | 0,713          | 0,570                            |
| 40          | 0,893                     | 12,9                             | 0,842           | 2,39                             | 0,898            | 52,8                             | 0,709          | 0,545                            |

Algunos otros líquidos

| Líquido y temperatura           | Densid. relat. | Visc. cinem. m <sup>2</sup> /seg |
|---------------------------------|----------------|----------------------------------|
| Turpentina a 20° C              | 0,862          | 1,73                             |
| Aceite de linaza a 30° C        | 0,925          | 35,9                             |
| Alcohol etílico a 20° C         | 0,789          | 1,54                             |
| Benceno a 20° C                 | 0,879          | 0,745                            |
| Glicerina a 20° C               | 1,262          | 662                              |
| Aceite de castor a 20° C        | 0,960          | 1030                             |
| Aceite ligero de máq. a 16,5° C | 0,907          | 137                              |

\* Kessler y Lenz, Universidad de Wisconsin, Madison.

\*\* ASCE Manual 25.

# TABLA 3

## COEFICIENTES DE FRICCIÓN $f$ PARA AGUA SOLAMENTE

(Intervalo de temperatura aproximado de 10° C a 21° C)

Para tuberías viejas — intervalo aproximado de  $\epsilon$ : 0,12 cm a 0,60 cm

Para tuberías usadas — intervalo aproximado de  $\epsilon$ : 0,06 cm a 0,09 cm

Para tuberías nuevas — intervalo aproximado de  $\epsilon$ : 0,015 cm a 0,03 cm

( $f$  = valor tabulado  $\times 10^{-4}$ )

| Diámetro y<br>tipo de tubería | VELOCIDAD (m/seg) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------------------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                               | 0,3               | 0,6 | 0,9 | 1,2 | 1,5 | 1,8 | 2,4 | 3,0 | 4,5 | 9,0 |
| 10 cm                         | Comercial vieja   | 435 | 415 | 410 | 405 | 400 | 395 | 395 | 390 | 385 |
|                               | Comercial usada   | 355 | 320 | 310 | 300 | 290 | 285 | 280 | 270 | 260 |
|                               | Tubería nueva     | 300 | 265 | 250 | 240 | 230 | 225 | 220 | 210 | 200 |
|                               | Muy lisa          | 240 | 205 | 190 | 180 | 170 | 165 | 155 | 140 | 130 |
| 15 cm                         | Comercial vieja   | 425 | 410 | 405 | 400 | 395 | 395 | 390 | 385 | 380 |
|                               | Comercial usada   | 335 | 310 | 300 | 285 | 280 | 275 | 265 | 260 | 250 |
|                               | Tubería nueva     | 275 | 250 | 240 | 225 | 220 | 210 | 205 | 200 | 190 |
|                               | Muy lisa          | 220 | 190 | 175 | 165 | 160 | 150 | 145 | 140 | 130 |
| 20 cm                         | Comercial vieja   | 420 | 405 | 400 | 395 | 390 | 385 | 380 | 375 | 370 |
|                               | Comercial usada   | 320 | 300 | 285 | 280 | 270 | 265 | 260 | 250 | 240 |
|                               | Tubería nueva     | 265 | 240 | 225 | 220 | 210 | 205 | 200 | 190 | 185 |
|                               | Muy lisa          | 205 | 180 | 165 | 155 | 150 | 140 | 135 | 130 | 120 |
| 25 cm                         | Comercial vieja   | 415 | 405 | 400 | 395 | 390 | 385 | 380 | 375 | 370 |
|                               | Comercial usada   | 315 | 295 | 280 | 270 | 265 | 260 | 255 | 240 | 230 |
|                               | Tubería nueva     | 260 | 230 | 220 | 210 | 205 | 200 | 190 | 185 | 180 |
|                               | Muy lisa          | 200 | 170 | 160 | 150 | 145 | 135 | 130 | 125 | 115 |
| 30 cm                         | Comercial vieja   | 415 | 400 | 395 | 395 | 390 | 385 | 380 | 375 | 365 |
|                               | Comercial usada   | 310 | 285 | 275 | 265 | 260 | 255 | 250 | 240 | 235 |
|                               | Tubería nueva     | 250 | 225 | 210 | 205 | 200 | 195 | 190 | 180 | 175 |
|                               | Muy lisa          | 190 | 165 | 150 | 140 | 140 | 135 | 125 | 120 | 115 |
| 40 cm                         | Comercial vieja   | 405 | 395 | 390 | 385 | 380 | 375 | 370 | 365 | 350 |
|                               | Comercial usada   | 300 | 280 | 265 | 260 | 255 | 250 | 240 | 235 | 225 |
|                               | Tubería nueva     | 240 | 220 | 205 | 200 | 195 | 190 | 180 | 175 | 170 |
|                               | Muy lisa          | 180 | 155 | 140 | 135 | 130 | 125 | 120 | 115 | 110 |
| 50 cm                         | Comercial vieja   | 400 | 395 | 390 | 385 | 380 | 375 | 370 | 365 | 350 |
|                               | Comercial usada   | 290 | 275 | 265 | 255 | 250 | 245 | 235 | 230 | 220 |
|                               | Tubería nueva     | 230 | 210 | 200 | 195 | 190 | 180 | 175 | 170 | 165 |
|                               | Muy lisa          | 170 | 150 | 135 | 130 | 125 | 120 | 115 | 110 | 105 |
| 60 cm                         | Comercial vieja   | 400 | 395 | 385 | 380 | 375 | 370 | 365 | 360 | 355 |
|                               | Comercial usada   | 285 | 265 | 255 | 250 | 245 | 240 | 230 | 225 | 220 |
|                               | Tubería nueva     | 225 | 200 | 195 | 190 | 185 | 180 | 175 | 170 | 165 |
|                               | Muy lisa          | 165 | 140 | 135 | 125 | 120 | 120 | 115 | 110 | 105 |
| 75 cm                         | Comercial vieja   | 400 | 385 | 380 | 375 | 370 | 365 | 360 | 355 | 350 |
|                               | Comercial usada   | 280 | 255 | 250 | 245 | 240 | 230 | 225 | 220 | 210 |
|                               | Tubería nueva     | 220 | 195 | 190 | 185 | 180 | 175 | 170 | 165 | 160 |
|                               | Muy lisa          | 160 | 135 | 130 | 120 | 115 | 115 | 110 | 110 | 105 |
| 90 cm                         | Comercial vieja   | 395 | 385 | 375 | 370 | 365 | 360 | 355 | 350 | 345 |
|                               | Comercial usada   | 275 | 255 | 245 | 240 | 235 | 230 | 225 | 220 | 210 |
|                               | Tubería nueva     | 215 | 195 | 185 | 180 | 175 | 170 | 165 | 160 | 155 |
|                               | Muy lisa          | 150 | 135 | 125 | 120 | 115 | 110 | 110 | 105 | 100 |
| 120 cm                        | Comercial vieja   | 395 | 385 | 370 | 365 | 360 | 355 | 350 | 345 | 340 |
|                               | Comercial usada   | 265 | 250 | 240 | 230 | 225 | 220 | 215 | 210 | 200 |
|                               | Tubería nueva     | 205 | 190 | 180 | 175 | 170 | 165 | 160 | 155 | 150 |
|                               | Muy lisa          | 140 | 125 | 120 | 115 | 110 | 110 | 105 | 100 | 95  |

**TABLA 4**  
**PERDIDAS DE CARGA EN ACCESORIOS**

(Subíndice 1 = aguas arriba y subíndice 2 = aguas abajo)

| Accesorio  | Pérdida de carga media                              |
|--|---|
| 1. De depósito a tubería – conexión a ras de la pared (pérdida a la entrada)   | $0,50 \frac{V_2^2}{2g}$                             |
| – tubería entrante   | $1,00 \frac{V_2^2}{2g}$                             |
| – conexión abocinada   | $0,05 \frac{V_2^2}{2g}$                             |
| 2. De tubería a depósito (pérdida a la salida)   | $1,00 \frac{V_1^2}{2g}$                             |
| 3. Ensanchamiento brusco   | $\frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}$                          |
| 4. Ensanchamiento gradual (véase Tabla 5)  | $K \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}$                        |
| 5. Venturímetros, boquillas y orificios  | $\left(\frac{1}{c_v^2} - 1\right) \frac{V_2^2}{2g}$ |
| 6. Contracción brusca (véase Tabla 5)  | $K_c \frac{V_2^2}{2g}$                              |
| 7. Codos, accesorios, válvulas*  | $K \frac{V^2}{2g}$                                  |
| Algunos valores corrientes de $K$ son:<br>45°, codo ..... 0,35 a 0,45<br>90°, codo ..... 0,50 a 0,75<br>Tes ..... 1,50 a 2,00<br>Válvulas de compuerta (abierta) ..... aprox. 0,25<br>Válvulas de control (abierta) ..... aprox. 3,0 |   |

\* Véanse manuales de hidráulica para más detalles.

## TABLA 5

VALORES DE  $K^*$   
Contracciones y ensanchamientos

| Contracción brusca |       | Ensanchamiento gradual para un ángulo total del cono |      |      |      |      |      |      |
|--------------------|-------|--|------|------|------|------|------|------|
| $d_1/d_2$          | $K_c$ | 4°   | 10°  | 15°  | 20°  | 30°  | 50°  | 60°  |
| 1,2                | 0,08  | 0,02   | 0,04 | 0,09 | 0,16 | 0,25 | 0,35 | 0,37 |
| 1,4                | 0,17  | 0,03   | 0,06 | 0,12 | 0,23 | 0,36 | 0,50 | 0,53 |
| 1,6                | 0,26  | 0,03   | 0,07 | 0,14 | 0,26 | 0,42 | 0,57 | 0,61 |
| 1,8                | 0,34  | 0,04   | 0,07 | 0,15 | 0,28 | 0,44 | 0,61 | 0,65 |
| 2,0                | 0,37  | 0,04   | 0,07 | 0,16 | 0,29 | 0,46 | 0,63 | 0,68 |
| 2,5                | 0,41  | 0,04   | 0,08 | 0,16 | 0,30 | 0,48 | 0,65 | 0,70 |
| 3,0                | 0,43  | 0,04   | 0,08 | 0,16 | 0,31 | 0,48 | 0,66 | 0,71 |
| 4,0                | 0,45  | 0,04   | 0,08 | 0,16 | 0,31 | 0,49 | 0,67 | 0,72 |
| 5,0                | 0,46  | 0,04   | 0,08 | 0,16 | 0,31 | 0,50 | 0,67 | 0,72 |

\* Valores tomados de King, *Handbook of Hydraulics*, McGraw-Hill Book Company.

## TABLA 6

ALGUNOS VALORES DEL COEFICIENTE  $C_1$  DE HAZEN-WILLIAMS

|   |     |
|---|-----|
| Tuberías rectas y muy lisas.....                              | 140 |
| Tuberías de fundición lisas y nuevas.....                     | 130 |
| Tuberías de fundición usadas y de acero roblonado nuevas..... | 110 |
| Tuberías de alcantarillado vitrificadas.....                  | 110 |
| Tuberías de fundición con algunos años de servicio.....       | 100 |
| Tuberías de fundición en malas condiciones.....               | 80  |

**TABLA 7**

**COEFICIENTES DE DESAGÜE PARA ORIFICIOS CIRCULARES DE ARISTA VIVA**

Para agua a 15° C vertiendo en aire a la misma temperatura

| Altura<br>de carga<br>en metros | Diámetro del orificio en cm |       |       |       |       |
|---------------------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                                 | 0,625                       | 1,250 | 1,875 | 2,500 | 5,00  |
| 0,24                            | 0,647                       | 0,627 | 0,616 | 0,609 | 0,603 |
| 0,42                            | 0,635                       | 0,619 | 0,610 | 0,605 | 0,601 |
| 0,60                            | 0,629                       | 0,615 | 0,607 | 0,603 | 0,600 |
| 1,20                            | 0,621                       | 0,609 | 0,603 | 0,600 | 0,598 |
| 1,80                            | 0,617                       | 0,607 | 0,601 | 0,599 | 0,597 |
| 2,40                            | 0,614                       | 0,605 | 0,600 | 0,598 | 0,596 |
| 3,00                            | 0,613                       | 0,604 | 0,600 | 0,597 | 0,595 |
| 3,60                            | 0,612                       | 0,603 | 0,599 | 0,597 | 0,595 |
| 4,20                            | 0,611                       | 0,602 | 0,598 | 0,596 | 0,594 |
| 4,80                            | 0,610                       | 0,602 | 0,598 | 0,596 | 0,594 |
| 6,00                            | 0,609                       | 0,602 | 0,598 | 0,596 | 0,594 |
| 7,50                            | 0,608                       | 0,601 | 0,597 | 0,596 | 0,594 |
| 9,00                            | 0,607                       | 0,600 | 0,597 | 0,595 | 0,594 |
| 12,00                           | 0,606                       | 0,600 | 0,596 | 0,595 | 0,594 |
| 15,00                           | 0,605                       | 0,599 | 0,596 | 0,595 | 0,593 |
| 18,00                           | 0,605                       | 0,599 | 0,596 | 0,594 | 0,593 |

*Fuente:* F. W. Medaugh y G. D. Johnson, Civil Engr., julio 1940, pág. 424.

TABLA 8

ALGUNOS FACTORES DE EXPANSION Y PARA FLUJO COMPRESIBLE  
A TRAVES DE TOBERAS Y VENTURIMETROS

| $p_2/p_1$ | $k$  | Relación de diámetros ( $d_2/d_1$ ) |       |       |       |       |
|-----------|------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|           |      | 0,30                                | 0,40  | 0,50  | 0,60  | 0,70  |
| 0,95      | 1,40 | 0,973                               | 0,972 | 0,971 | 0,968 | 0,962 |
|           | 1,30 | 0,970                               | 0,970 | 0,968 | 0,965 | 0,959 |
|           | 1,20 | 0,968                               | 0,967 | 0,966 | 0,963 | 0,956 |
| 0,90      | 1,40 | 0,944                               | 0,943 | 0,941 | 0,935 | 0,925 |
|           | 1,30 | 0,940                               | 0,939 | 0,936 | 0,931 | 0,918 |
|           | 1,20 | 0,935                               | 0,933 | 0,931 | 0,925 | 0,912 |
| 0,85      | 1,40 | 0,915                               | 0,914 | 0,910 | 0,902 | 0,887 |
|           | 1,30 | 0,910                               | 0,907 | 0,904 | 0,896 | 0,880 |
|           | 1,20 | 0,902                               | 0,900 | 0,896 | 0,887 | 0,870 |
| 0,80      | 1,40 | 0,886                               | 0,884 | 0,880 | 0,868 | 0,850 |
|           | 1,30 | 0,876                               | 0,873 | 0,869 | 0,857 | 0,839 |
|           | 1,20 | 0,866                               | 0,864 | 0,859 | 0,848 | 0,829 |
| 0,75      | 1,40 | 0,856                               | 0,853 | 0,846 | 0,836 | 0,814 |
|           | 1,30 | 0,844                               | 0,841 | 0,836 | 0,823 | 0,802 |
|           | 1,20 | 0,820                               | 0,818 | 0,812 | 0,798 | 0,776 |
| 0,70      | 1,40 | 0,824                               | 0,820 | 0,815 | 0,800 | 0,778 |
|           | 1,30 | 0,812                               | 0,808 | 0,802 | 0,788 | 0,763 |
|           | 1,20 | 0,794                               | 0,791 | 0,784 | 0,770 | 0,745 |

Para  $p_2/p_1 = 1,00$ ,  $Y = 1,00$ .

TABLA 9

ALGUNOS VALORES MEDIOS DE  $n$  EMPLEADOS EN LAS FORMULAS  
DE KUTTER Y MANNING Y DE  $m$  EN LA FORMULA DE BAZIN

| Tipo de canal abierto   | $n$   | $m$  |
|---|-------|------|
| Cemento muy pulido, madera muy bien acepillada  | 0,010 | 0,11 |
| Madera acepillada, acequias de duelas de madera nuevas, fundición   | 0,012 | 0,20 |
| Tubería de alcantarillado bien vitrificada, buena mampostería, tubería de hormigón, ordinario, madera sin acepillar, acequias de balasto liso | 0,013 | 0,29 |
| Tubería de alcantarillado de arcilla ordinaria y tubería de fundición ordinaria, cemento con pulido ordinario                                 | 0,015 | 0,40 |
| Canales de tierra, rectos y bien conservados  | 0,023 | 1,54 |
| Canales de tierra dragados en condiciones ordinarias  | 0,027 | 2,36 |
| Canales labrados en roca  | 0,040 | 3,50 |
| Ríos en buenas condiciones  | 0,030 | 3,00 |

TABLA 10  
VALORES DE C DE LA FORMULA DE KUTTER

| Pendiente<br><i>S</i> | <i>n</i> | Radio hidráulico <i>R</i> en metros |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |  |
|-----------------------|----------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|--|
|                       |          | 0,06                                | 0,09 | 0,12 | 0,18 | 0,24 | 0,30 | 0,45 | 0,60 | 0,75 | 0,90 | 1,20 | 1,80 | 2,40 | 3,00 | 4,50 |  |  |
| 0,00005               | 0,010    | 48                                  | 54   | 60   | 68   | 73   | 77   | 85   | 91   | 95   | 98   | 103  | 110  | 114  | 118  | 121  |  |  |
|                       | 0,012    | 38                                  | 43   | 49   | 54   | 59   | 62   | 70   | 75   | 78   | 82   | 87   | 93   | 97   | 100  | 104  |  |  |
|                       | 0,015    | 29                                  | 32   | 36   | 42   | 46   | 49   | 55   | 59   | 62   | 65   | 70   | 76   | 80   | 83   | 88   |  |  |
|                       | 0,017    | 24                                  | 28   | 31   | 36   | 40   | 43   | 47   | 51   | 54   | 57   | 62   | 67   | 71   | 74   | 78   |  |  |
|                       | 0,020    | 19                                  | 23   | 25   | 29   | 33   | 35   | 40   | 44   | 46   | 49   | 52   | 58   | 61   | 64   | 69   |  |  |
|                       | 0,025    | 14                                  | 17   | 19   | 23   | 25   | 27   | 31   | 34   | 36   | 39   | 43   | 47   | 51   | 53   | 57   |  |  |
|                       | 0,030    | 12                                  | 14   | 15   | 18   | 20   | 22   | 26   | 28   | 30   | 32   | 36   | 41   | 43   | 46   | 50   |  |  |
| 0,0001                | 0,010    | 54                                  | 60   | 65   | 72   | 77   | 81   | 87   | 92   | 95   | 98   | 103  | 108  | 112  | 114  | 117  |  |  |
|                       | 0,012    | 42                                  | 47   | 52   | 58   | 62   | 66   | 72   | 76   | 79   | 82   | 86   | 91   | 94   | 96   | 99   |  |  |
|                       | 0,015    | 31                                  | 35   | 40   | 45   | 49   | 51   | 57   | 60   | 63   | 65   | 69   | 74   | 77   | 79   | 83   |  |  |
|                       | 0,017    | 26                                  | 30   | 34   | 39   | 41   | 44   | 49   | 52   | 55   | 57   | 61   | 65   | 69   | 71   | 75   |  |  |
|                       | 0,020    | 21                                  | 25   | 28   | 31   | 35   | 37   | 41   | 45   | 47   | 49   | 52   | 56   | 59   | 61   | 65   |  |  |
|                       | 0,025    | 15                                  | 19   | 21   | 24   | 26   | 28   | 33   | 35   | 37   | 39   | 43   | 46   | 49   | 51   | 54   |  |  |
|                       | 0,030    | 13                                  | 15   | 17   | 19   | 22   | 23   | 26   | 29   | 30   | 33   | 35   | 40   | 41   | 44   | 47   |  |  |
| 0,0002                | 0,010    | 58                                  | 63   | 69   | 76   | 80   | 83   | 89   | 93   | 96   | 98   | 102  | 107  | 109  | 112  | 114  |  |  |
|                       | 0,012    | 46                                  | 51   | 55   | 61   | 65   | 68   | 73   | 77   | 79   | 82   | 85   | 89   | 92   | 94   | 97   |  |  |
|                       | 0,015    | 34                                  | 38   | 42   | 46   | 50   | 53   | 58   | 61   | 63   | 65   | 68   | 73   | 76   | 77   | 80   |  |  |
|                       | 0,017    | 29                                  | 33   | 36   | 40   | 43   | 46   | 50   | 54   | 55   | 57   | 61   | 65   | 67   | 69   | 72   |  |  |
|                       | 0,020    | 23                                  | 26   | 29   | 33   | 36   | 38   | 42   | 45   | 47   | 49   | 52   | 55   | 58   | 60   | 62   |  |  |
|                       | 0,025    | 17                                  | 19   | 22   | 25   | 28   | 30   | 33   | 36   | 38   | 39   | 42   | 46   | 47   | 50   | 52   |  |  |
|                       | 0,030    | 14                                  | 15   | 18   | 20   | 22   | 24   | 27   | 29   | 31   | 33   | 35   | 38   | 41   | 43   | 45   |  |  |
| 0,0004                | 0,010    | 61                                  | 67   | 71   | 77   | 82   | 84   | 91   | 94   | 96   | 98   | 102  | 106  | 108  | 110  | 112  |  |  |
|                       | 0,012    | 48                                  | 52   | 57   | 62   | 66   | 69   | 74   | 78   | 80   | 82   | 84   | 89   | 91   | 93   | 95   |  |  |
|                       | 0,015    | 35                                  | 40   | 43   | 48   | 51   | 54   | 59   | 62   | 63   | 65   | 68   | 72   | 74   | 76   | 78   |  |  |
|                       | 0,017    | 30                                  | 34   | 38   | 41   | 44   | 46   | 51   | 54   | 56   | 57   | 61   | 64   | 66   | 68   | 71   |  |  |
|                       | 0,020    | 24                                  | 28   | 30   | 34   | 37   | 39   | 43   | 46   | 47   | 49   | 52   | 55   | 57   | 59   | 61   |  |  |
|                       | 0,025    | 18                                  | 20   | 23   | 26   | 28   | 30   | 33   | 36   | 38   | 39   | 41   | 45   | 47   | 49   | 51   |  |  |
|                       | 0,030    | 14                                  | 17   | 18   | 21   | 23   | 24   | 28   | 30   | 31   | 33   | 35   | 38   | 40   | 41   | 44   |  |  |
| 0,001                 | 0,010    | 62                                  | 68   | 73   | 79   | 83   | 86   | 91   | 95   | 97   | 98   | 102  | 105  | 108  | 109  | 111  |  |  |
|                       | 0,012    | 49                                  | 54   | 58   | 63   | 67   | 70   | 75   | 78   | 80   | 82   | 85   | 88   | 91   | 92   | 94   |  |  |
|                       | 0,015    | 36                                  | 41   | 44   | 49   | 52   | 54   | 59   | 62   | 64   | 66   | 68   | 72   | 73   | 75   | 78   |  |  |
|                       | 0,017    | 30                                  | 35   | 38   | 42   | 45   | 47   | 51   | 54   | 56   | 58   | 61   | 63   | 66   | 67   | 70   |  |  |
|                       | 0,020    | 25                                  | 28   | 31   | 34   | 38   | 39   | 43   | 46   | 48   | 49   | 51   | 54   | 57   | 58   | 60   |  |  |
|                       | 0,025    | 18                                  | 21   | 24   | 26   | 29   | 30   | 34   | 36   | 38   | 39   | 41   | 45   | 46   | 48   | 50   |  |  |
|                       | 0,030    | 15                                  | 17   | 19   | 21   | 23   | 25   | 28   | 30   | 31   | 33   | 35   | 38   | 40   | 41   | 43   |  |  |
| 0,01                  | 0,010    | 63                                  | 69   | 73   | 79   | 83   | 86   | 91   | 95   | 97   | 98   | 102  | 105  | 107  | 108  | 110  |  |  |
|                       | 0,012    | 49                                  | 55   | 59   | 64   | 67   | 71   | 75   | 78   | 80   | 82   | 85   | 88   | 90   | 92   | 94   |  |  |
|                       | 0,015    | 37                                  | 42   | 45   | 49   | 52   | 55   | 59   | 62   | 64   | 66   | 68   | 71   | 73   | 75   | 77   |  |  |
|                       | 0,017    | 31                                  | 35   | 38   | 43   | 45   | 47   | 51   | 55   | 57   | 58   | 60   | 63   | 65   | 67   | 70   |  |  |
|                       | 0,020    | 25                                  | 29   | 31   | 35   | 38   | 40   | 43   | 46   | 48   | 49   | 51   | 54   | 56   | 58   | 60   |  |  |
|                       | 0,025    | 19                                  | 22   | 24   | 27   | 29   | 31   | 34   | 36   | 38   | 39   | 41   | 44   | 46   | 47   | 50   |  |  |
|                       | 0,030    | 15                                  | 17   | 19   | 22   | 24   | 25   | 28   | 30   | 32   | 33   | 35   | 37   | 39   | 40   | 43   |  |  |



# **TABLA 11\***

## **VALORES DEL FACTOR DE DESCARGA $K$ EN $Q = (K/n)y^{8/3}S^{1/2}$** **PARA CANALES TRAPEZOIDALES**

( $y$  = profundidad de la corriente,  $b$  = anchura de la solera del canal)

**Pendientes de los lados de la sección del canal (horizontal a vertical)**

| $y/b$ | Vertical | $\frac{1}{4} : 1$ | $\frac{1}{2} : 1$ | $\frac{3}{4} : 1$ | 1 : 1 | $1\frac{1}{2} : 1$ | 2 : 1 | $2\frac{1}{2} : 1$ | 3 : 1 | 4 : 1 |
|-------|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|-------|
| 0.01  | 98.7     | 99.1              | 99.3              | 99.6              | 99.8  | 100.1              | 100.4 | 100.6              | 100.9 | 101.3 |
| 0.02  | 48.7     | 49.1              | 49.4              | 49.6              | 49.8  | 50.1               | 50.4  | 50.7               | 50.9  | 51.3  |
| 0.03  | 32.0     | 32.4              | 32.7              | 33.0              | 33.2  | 33.5               | 33.8  | 34.1               | 34.3  | 34.7  |
| 0.04  | 23.8     | 24.1              | 24.4              | 24.6              | 24.8  | 25.2               | 25.4  | 25.7               | 26.0  | 26.4  |
| 0.05  | 18.8     | 19.1              | 19.4              | 19.7              | 19.9  | 20.2               | 20.5  | 20.8               | 21.0  | 21.5  |
| 0.06  | 15.5     | 15.8              | 16.1              | 16.4              | 16.6  | 16.9               | 17.2  | 17.5               | 17.7  | 18.2  |
| 0.07  | 13.12    | 13.46             | 13.73             | 14.0              | 14.2  | 14.5               | 14.8  | 15.1               | 15.3  | 15.9  |
| 0.08  | 11.31    | 11.64             | 11.98             | 12.18             | 12.38 | 12.72              | 13.06 | 13.33              | 13.59 | 14.13 |
| 0.09  | 9.96     | 10.30             | 10.57             | 10.83             | 11.04 | 11.37              | 11.71 | 11.98              | 12.25 | 12.79 |
| 0.10  | 8.88     | 9.22              | 9.49              | 9.69              | 9.96  | 10.30              | 10.57 | 10.90              | 11.17 | 11.71 |
| 0.11  | 7.96     | 8.30              | 8.59              | 8.82              | 9.03  | 9.35               | 9.69  | 10.03              | 10.30 | 10.83 |
| 0.12  | 7.22     | 7.56              | 7.84              | 8.08              | 8.28  | 8.61               | 8.95  | 9.29               | 9.56  | 10.09 |
| 0.13  | 6.60     | 6.92              | 7.21              | 7.44              | 7.65  | 8.01               | 8.34  | 8.61               | 8.95  | 9.49  |
| 0.14  | 6.06     | 6.39              | 6.67              | 6.90              | 7.11  | 7.47               | 7.81  | 8.08               | 8.41  | 9.02  |
| 0.15  | 5.60     | 5.92              | 6.20              | 6.44              | 6.65  | 7.00               | 7.34  | 7.67               | 7.94  | 8.55  |
| 0.16  | 5.20     | 5.52              | 5.79              | 6.03              | 6.24  | 6.60               | 6.92  | 7.23               | 7.54  | 8.14  |
| 0.17  | 4.84     | 5.16              | 5.44              | 5.67              | 5.88  | 6.25               | 6.58  | 6.88               | 7.19  | 7.81  |
| 0.18  | 4.53     | 4.85              | 5.12              | 5.36              | 5.57  | 5.93               | 6.26  | 6.57               | 6.87  | 7.47  |
| 0.19  | 4.25     | 4.56              | 4.84              | 5.07              | 5.28  | 5.65               | 5.98  | 6.29               | 6.60  | 7.20  |
| 0.20  | 4.00     | 4.31              | 4.58              | 4.82              | 5.03  | 5.39               | 5.72  | 6.04               | 6.35  | 6.93  |
| 0.22  | 3.57     | 3.88              | 4.15              | 4.38              | 4.59  | 4.95               | 5.29  | 5.61               | 5.92  | 6.53  |
| 0.24  | 3.21     | 3.51              | 3.78              | 4.01              | 4.22  | 4.59               | 4.93  | 5.24               | 5.56  | 6.18  |
| 0.26  | 2.91     | 3.21              | 3.47              | 3.71              | 3.92  | 4.29               | 4.62  | 4.95               | 5.26  | 5.88  |
| 0.28  | 2.66     | 2.95              | 3.21              | 3.45              | 3.65  | 4.02               | 4.36  | 4.68               | 5.00  | 5.63  |
| 0.30  | 2.44     | 2.73              | 2.99              | 3.22              | 3.43  | 3.80               | 4.14  | 4.46               | 4.78  | 5.41  |
| 0.32  | 2.25     | 2.54              | 2.79              | 3.02              | 3.23  | 3.60               | 3.94  | 4.27               | 4.59  | 5.22  |
| 0.34  | 2.08     | 2.36              | 2.62              | 2.85              | 3.06  | 3.43               | 3.77  | 4.10               | 4.41  | 5.05  |
| 0.36  | 1.94     | 2.21              | 2.47              | 2.70              | 2.90  | 3.28               | 3.62  | 3.94               | 4.27  | 4.90  |
| 0.38  | 1.80     | 2.08              | 2.34              | 2.56              | 2.77  | 3.14               | 3.48  | 3.81               | 4.13  | 4.77  |
| 0.40  | 1.69     | 1.97              | 2.21              | 2.44              | 2.64  | 3.01               | 3.36  | 3.69               | 4.01  | 4.65  |
| 0.42  | 1.59     | 1.86              | 2.11              | 2.33              | 2.54  | 2.91               | 3.25  | 3.58               | 3.90  | 4.54  |
| 0.44  | 1.49     | 1.76              | 2.01              | 2.23              | 2.44  | 2.81               | 3.15  | 3.48               | 3.81  | 4.44  |
| 0.46  | 1.41     | 1.67              | 1.92              | 2.14              | 2.34  | 2.72               | 3.06  | 3.39               | 3.71  | 4.35  |
| 0.48  | 1.33     | 1.59              | 1.83              | 2.06              | 2.26  | 2.63               | 2.98  | 3.31               | 3.63  | 4.27  |
| 0.50  | 1.26     | 1.52              | 1.76              | 1.98              | 2.19  | 2.56               | 2.90  | 3.24               | 3.56  | 4.20  |
| 0.55  | 1.11     | 1.36              | 1.59              | 1.82              | 2.02  | 2.39               | 2.74  | 3.07               | 3.40  | 4.04  |
| 0.60  | 0.983    | 1.23              | 1.46              | 1.68              | 1.88  | 2.25               | 2.60  | 2.93               | 3.26  | 3.90  |
| 0.70  | 0.794    | 1.03              | 1.26              | 1.47              | 1.67  | 2.04               | 2.39  | 2.72               | 3.05  | 3.69  |
| 0.80  | 0.661    | 0.882             | 1.10              | 1.31              | 1.51  | 1.88               | 2.23  | 2.56               | 2.89  | 3.54  |
| 0.90  | 0.559    | 0.774             | 0.989             | 1.20              | 1.39  | 1.76               | 2.11  | 2.44               | 2.77  | 3.42  |
| 1.00  | 0.481    | 0.686             | 0.895             | 1.10              | 1.30  | 1.66               | 2.01  | 2.34               | 2.67  | 3.32  |
| 1.20  | 0.369    | 0.563             | 0.767             | 0.962             | 1.16  | 1.52               | 1.86  | 2.20               | 2.53  | 3.18  |
| 1.40  | 0.293    | 0.476             | 0.672             | 0.868             | 1.06  | 1.42               | 1.76  | 2.10               | 2.42  | 3.08  |
| 1.60  | 0.240    | 0.415             | 0.604             | 0.794             | 0.983 | 1.35               | 1.69  | 2.02               | 2.35  | 2.99  |
| 1.80  | 0.201    | 0.367             | 0.552             | 0.740             | 0.929 | 1.29               | 1.63  | 1.96               | 2.29  | 2.93  |
| 2.00  | 0.171    | 0.330             | 0.511             | 0.700             | 0.882 | 1.24               | 1.58  | 1.91               | 2.24  | 2.89  |
| 2.25  | 0.143    | 0.295             | 0.471             | 0.655             | 0.834 | 1.19               | 1.53  | 1.86               | 2.19  | 2.84  |

\* Valores tomados de King, de *Handbook of Hydraulics*, 4.<sup>a</sup> ed., McGraw-Hill Co.

# TABLA 12\*

VALORES DEL FACTOR DE DESCARGA  $K'$  EN  $Q = (K'/n)b^{8/3}S^{1/2}$   
PARA CANALES TRAPEZOIDALES

( $v$  = profundidad de la corriente,  $h$  = anchura de la solera del canal)

Pendientes de los lados de la sección del canal (horizontal a vertical)

| $y/b$ | Verti-<br>cal | 1 : 1   | 1 1/2 : 1 | 3/4 : 1 | 1 : 1   | 1 1/2 : 1 | 2 : 1   | 2 1/2 : 1 | 3 : 1   | 4 : 1   |
|-------|---------------|---------|-----------|---------|---------|-----------|---------|-----------|---------|---------|
| 0,01  | 0,00046       | 0,00046 | 0,00046   | 0,00046 | 0,00046 | 0,00046   | 0,00046 | 0,00046   | 0,00047 | 0,00047 |
| 0,02  | 0,00143       | 0,00145 | 0,00145   | 0,00146 | 0,00147 | 0,00148   | 0,00149 | 0,00149   | 0,00150 | 0,00151 |
| 0,03  | 0,00279       | 0,00282 | 0,00285   | 0,00287 | 0,00288 | 0,00291   | 0,00293 | 0,00295   | 0,00298 | 0,00302 |
| 0,04  | 0,00444       | 0,00451 | 0,00457   | 0,00461 | 0,00465 | 0,00471   | 0,00476 | 0,00482   | 0,00489 | 0,00495 |
| 0,05  | 0,00637       | 0,00649 | 0,00659   | 0,00667 | 0,00674 | 0,00686   | 0,00695 | 0,00705   | 0,00713 | 0,00731 |
| 0,06  | 0,00855       | 0,00875 | 0,00888   | 0,00902 | 0,00915 | 0,00929   | 0,00949 | 0,00962   | 0,00976 | 0,01009 |
| 0,07  | 0,01090       | 0,01117 | 0,01144   | 0,01164 | 0,01178 | 0,01211   | 0,01231 | 0,01258   | 0,01277 | 0,01326 |
| 0,08  | 0,01346       | 0,0139  | 0,0142    | 0,0145  | 0,0147  | 0,0151    | 0,0155  | 0,0159    | 0,0162  | 0,0168  |
| 0,09  | 0,0162        | 0,0168  | 0,0172    | 0,0176  | 0,0180  | 0,0185    | 0,0190  | 0,0194    | 0,0199  | 0,0209  |
| 0,10  | 0,0191        | 0,0198  | 0,0205    | 0,0209  | 0,0214  | 0,0221    | 0,0228  | 0,0234    | 0,0241  | 0,0253  |
| 0,11  | 0,0221        | 0,0231  | 0,0238    | 0,0245  | 0,0251  | 0,0260    | 0,0269  | 0,0278    | 0,0285  | 0,0301  |
| 0,12  | 0,0253        | 0,0264  | 0,0275    | 0,0283  | 0,0290  | 0,0303    | 0,0314  | 0,0324    | 0,0334  | 0,0355  |
| 0,13  | 0,0286        | 0,0300  | 0,0312    | 0,0323  | 0,0332  | 0,0347    | 0,0361  | 0,0374    | 0,0387  | 0,0413  |
| 0,14  | 0,0320        | 0,0338  | 0,0353    | 0,0365  | 0,0376  | 0,0395    | 0,0412  | 0,0428    | 0,0443  | 0,0475  |
| 0,15  | 0,0355        | 0,0376  | 0,0394    | 0,0409  | 0,0422  | 0,0445    | 0,0466  | 0,0485    | 0,0504  | 0,0542  |
| 0,16  | 0,0392        | 0,0417  | 0,0437    | 0,0455  | 0,0471  | 0,0498    | 0,0523  | 0,0546    | 0,0569  | 0,0614  |
| 0,17  | 0,0429        | 0,0458  | 0,0482    | 0,0503  | 0,0522  | 0,0554    | 0,0583  | 0,0610    | 0,0637  | 0,0690  |
| 0,18  | 0,0468        | 0,0501  | 0,0529    | 0,0553  | 0,0575  | 0,0612    | 0,0646  | 0,0678    | 0,0710  | 0,0773  |
| 0,19  | 0,0507        | 0,0544  | 0,0577    | 0,0605  | 0,0630  | 0,0764    | 0,0713  | 0,0750    | 0,0787  | 0,0859  |
| 0,20  | 0,0546        | 0,0590  | 0,0627    | 0,0659  | 0,0687  | 0,0738    | 0,0783  | 0,0826    | 0,0868  | 0,0952  |
| 0,22  | 0,0629        | 0,0683  | 0,0734    | 0,0774  | 0,0808  | 0,0875    | 0,0935  | 0,0989    | 0,1043  | 0,1151  |
| 0,24  | 0,0714        | 0,0781  | 0,0841    | 0,0895  | 0,0942  | 0,1023    | 0,1097  | 0,1164    | 0,1238  | 0,1373  |
| 0,26  | 0,0801        | 0,0882  | 0,0956    | 0,1023  | 0,1077  | 0,1178    | 0,1272  | 0,1359    | 0,1447  | 0,1622  |
| 0,28  | 0,0888        | 0,0989  | 0,108     | 0,116   | 0,122   | 0,135     | 0,146   | 0,157     | 0,168   | 0,189   |
| 0,30  | 0,0983        | 0,1097  | 0,120     | 0,130   | 0,138   | 0,153     | 0,167   | 0,180     | 0,193   | 0,218   |
| 0,32  | 0,1077        | 0,1211  | 0,134     | 0,145   | 0,155   | 0,172     | 0,189   | 0,205     | 0,220   | 0,250   |
| 0,34  | 0,1171        | 0,133   | 0,147     | 0,160   | 0,172   | 0,193     | 0,213   | 0,231     | 0,256   | 0,285   |
| 0,36  | 0,1272        | 0,145   | 0,162     | 0,177   | 0,190   | 0,215     | 0,238   | 0,259     | 0,280   | 0,322   |
| 0,38  | 0,137         | 0,157   | 0,177     | 0,194   | 0,210   | 0,238     | 0,264   | 0,289     | 0,313   | 0,361   |
| 0,40  | 0,147         | 0,170   | 0,192     | 0,212   | 0,229   | 0,262     | 0,292   | 0,320     | 0,349   | 0,404   |
| 0,42  | 0,157         | 0,184   | 0,208     | 0,230   | 0,251   | 0,287     | 0,322   | 0,354     | 0,386   | 0,450   |
| 0,44  | 0,167         | 0,197   | 0,225     | 0,250   | 0,273   | 0,314     | 0,353   | 0,390     | 0,426   | 0,498   |
| 0,46  | 0,178         | 0,211   | 0,242     | 0,270   | 0,295   | 0,343     | 0,386   | 0,428     | 0,468   | 0,549   |
| 0,48  | 0,188         | 0,225   | 0,259     | 0,291   | 0,319   | 0,372     | 0,421   | 0,468     | 0,513   | 0,604   |
| 0,50  | 0,199         | 0,239   | 0,277     | 0,312   | 0,344   | 0,402     | 0,457   | 0,509     | 0,561   | 0,662   |
| 0,55  | 0,225         | 0,276   | 0,324     | 0,369   | 0,410   | 0,486     | 0,556   | 0,623     | 0,690   | 0,821   |
| 0,60  | 0,252         | 0,315   | 0,375     | 0,431   | 0,483   | 0,577     | 0,666   | 0,752     | 0,834   | 1,003   |
| 0,70  | 0,308         | 0,398   | 0,485     | 0,568   | 0,645   | 0,787     | 0,922   | 1,050     | 1,178   | 1,427   |
| 0,80  | 0,365         | 0,488   | 0,610     | 0,725   | 0,834   | 1,036     | 1,231   | 1,413     | 1,595   | 1,952   |
| 0,90  | 0,423         | 0,585   | 0,747     | 0,902   | 1,050   | 1,332     | 1,588   | 1,844     | 2,093   | 2,577   |
| 1,00  | 0,480         | 0,688   | 0,895     | 1,104   | 1,299   | 1,662     | 2,012   | 2,342     | 2,672   | 3,318   |
| 1,20  | 0,600         | 0,915   | 1,245     | 1,568   | 1,878   | 2,470     | 3,035   | 3,580     | 4,112   | 5,162   |
| 1,40  | 0,720         | 1,171   | 1,649     | 2,127   | 2,591   | 3,479     | 4,320   | 5,141     | 5,949   | 7,537   |
| 1,60  | 0,841         | 1,454   | 2,113     | 2,786   | 3,445   | 4,704     | 5,908   | 7,079     | 8,210   | 10,498  |
| 1,80  | 0,962         | 1,763   | 2,645     | 3,553   | 4,441   | 6,157     | 7,806   | 9,421     | 10,969  | 14,065  |
| 2,00  | 1,083         | 2,100   | 3,244     | 4,428   | 5,599   | 7,873     | 10,027  | 12,180    | 14,266  | 18,371  |
| 2,25  | 1,238         | 2,564   | 4,098     | 5,693   | 7,268   | 10,363    | 13,324  | 16,218    | 19,112  | 24,697  |

TABLA 13

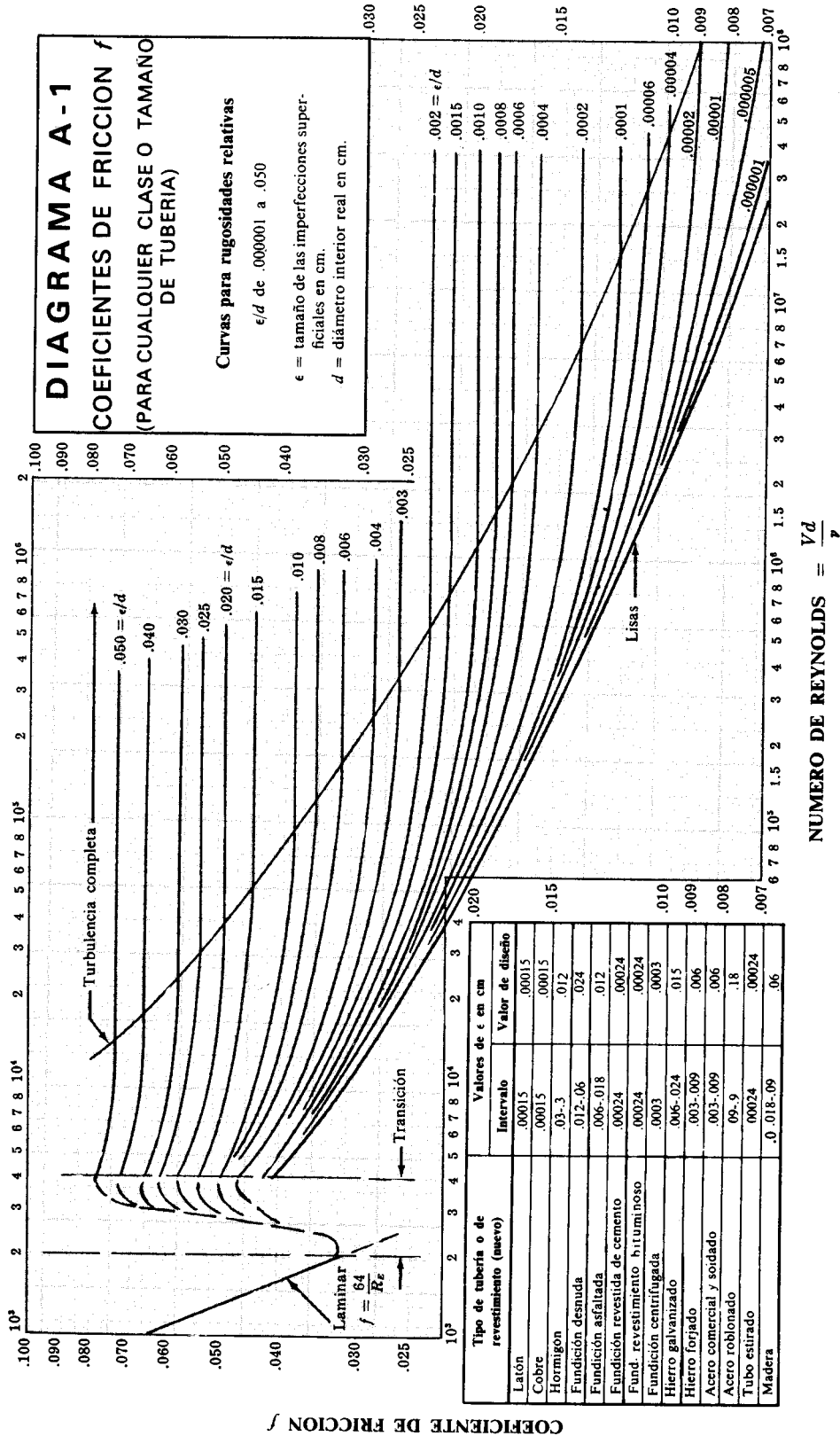
## AREAS DE CIRCULOS

| Diámetro interior<br>(cm) | Area<br>(cm <sup>2</sup> ) | Diámetro interior<br>(cm <sup>2</sup> ) | Area<br>(cm <sup>2</sup> ) |
|---------------------------|----------------------------|---|----------------------------|
| 2,0                       | 3,14                       | 25                                      | 490,9                      |
| 2,5                       | 4,91                       | 30                                      | 706,9                      |
| 3,0                       | 7,07                       | 35                                      | 962,1                      |
| 3,5                       | 9,62                       | 40                                      | 1.257                      |
| 4,0                       | 12,57                      | 45                                      | 1.590                      |
| 4,5                       | 15,90                      | 50                                      | 1.964                      |
| 5,0                       | 19,64                      | 75                                      | 4.418                      |
| 5,5                       | 23,76                      | 100                                     | 7.854                      |
| 6,0                       | 28,27                      | 125                                     | 12.272                     |
| 7,0                       | 38,48                      | 150                                     | 17.672                     |
| 8,0                       | 50,27                      | 175                                     | 24.053                     |
| 9,0                       | 63,62                      | 200                                     | 31.416                     |
| 10,0                      | 78,54                      | 225                                     | 39,761                     |
| 15,0                      | 176,7                      | 250                                     | 49,087                     |
| 20,0                      | 314,2                      | 300                                     | 70.686                     |

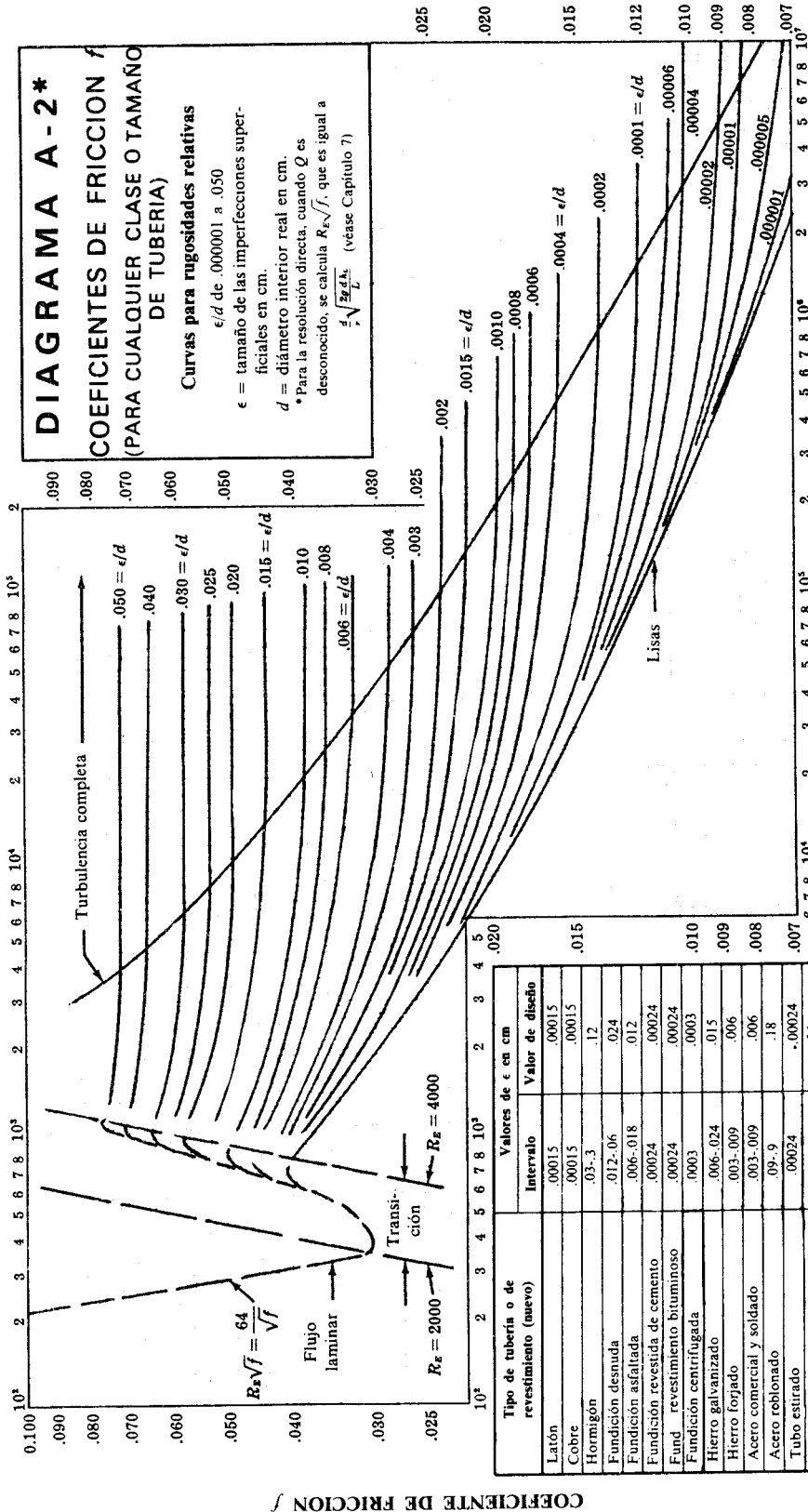
TABLA 14

## PESOS Y DIMENSIONES DE TUBERIAS DE FUNDICION

| Diám. Nom.<br>de tubería |     | Tubería tipo A<br>(carga 30 m) |                           |                | Tubería tipo B<br>(carga 60 m) |                           |                | Tubería tipo C<br>(carga 90 m) |                           |                |
|--------------------------|-----|--------------------------------|---------------------------|----------------|--------------------------------|---------------------------|----------------|--------------------------------|---------------------------|----------------|
|                          |     | Espesor<br>de<br>pared<br>(cm) | Diám.<br>interior<br>(cm) | Peso<br>(kg/m) | Espesor<br>de<br>pared<br>(cm) | Diám.<br>interior<br>(cm) | Peso<br>(kg/m) | Espesor<br>de<br>pared<br>(cm) | Diám.<br>interior<br>(cm) | Peso<br>(kg/m) |
| 4                        | 10  | 1,07                           | 10,06                     | 29,8           | 1,14                           | 10,41                     | 32,3           | 1,22                           | 10,26                     | 34,7           |
| 6                        | 15  | 1,12                           | 15,29                     | 45,8           | 1,22                           | 15,60                     | 49,6           | 1,30                           | 15,44                     | 53,3           |
| 8                        | 20  | 1,17                           | 20,65                     | 63,9           | 1,30                           | 20,40                     | 70,7           | 1,42                           | 20,78                     | 77,6           |
| 10                       | 25  | 1,27                           | 25,65                     | 85,0           | 1,45                           | 25,30                     | 95,0           | 1,57                           | 25,81                     | 105,4          |
| 12                       | 30  | 1,37                           | 30,78                     | 107,9          | 1,57                           | 30,38                     | 122,2          | 1,73                           | 30,84                     | 136,5          |
| 14                       | 35  | 1,45                           | 35,97                     | 133,4          | 1,68                           | 35,51                     | 152,6          | 1,88                           | 35,99                     | 173,7          |
| 16                       | 40  | 1,52                           | 41,15                     | 161,2          | 1,78                           | 40,64                     | 186,1          | 2,03                           | 41,15                     | 214,0          |
| 18                       | 45  | 1,63                           | 46,28                     | 192,3          | 1,91                           | 45,72                     | 223,3          | 2,21                           | 46,18                     | 260,5          |
| 20                       | 50  | 1,70                           | 51,46                     | 223,3          | 2,03                           | 50,80                     | 260,5          | 2,34                           | 51,36                     | 310,1          |
| 24                       | 60  | 1,93                           | 61,67                     | 304,0          | 2,26                           | 61,01                     | 347,3          | 2,64                           | 61,57                     | 415,6          |
| 30                       | 75  | 2,24                           | 76,15                     | 434,2          | 2,62                           | 76,05                     | 496,1          | 3,05                           | 76,20                     | 595,4          |
| 36                       | 90  | 2,51                           | 91,39                     | 583,1          | 2,92                           | 91,44                     | 676,1          | 3,45                           | 91,39                     | 812,4          |
| 42                       | 105 | 2,79                           | 106,68                    | 762,9          | 3,25                           | 106,53                    | 880,8          | 3,91                           | 106,73                    | 1.066,8        |
| 48                       | 120 | 3,20                           | 121,87                    | 992,4          | 3,61                           | 121,82                    | 1.116,4        | 4,34                           | 121,87                    | 1.352,0        |
| 54                       | 135 | 3,43                           | 137,06                    | 1.190,8        | 3,94                           | 137,16                    | 1.389,2        | 4,83                           | 137,16                    | 1.699,9        |
| 60                       | 150 | 3,53                           | 152,45                    | 1.364,5        | 4,24                           | 152,55                    | 1.643,3        | 5,08                           | 152,91                    | 1.997,6        |
| 72                       | 180 | 4,11                           | 183,13                    | 1.908,3        | 4,95                           | 183,13                    | 2.302,7        | 6,07                           | 183,13                    | 2.834,2        |
| 84                       | 210 | 4,37                           | 213,61                    | 2.435,2        | 5,64                           | 213,61                    | 3.131,9        |                                |                           |                |



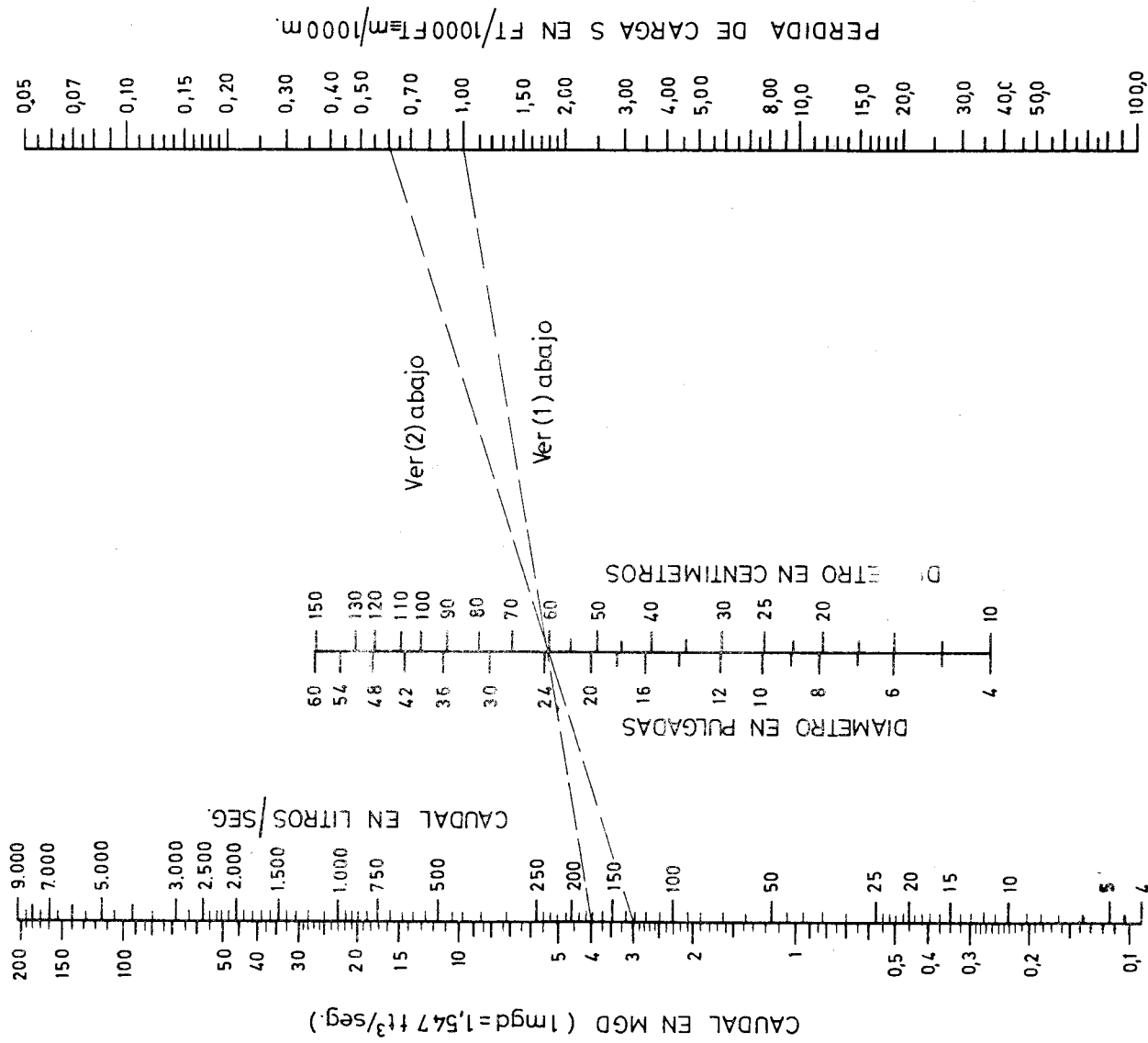
*Nota:* Por razones tipográficas, se ha conservado en estos diagramas la notación decimal de la edición en inglés.



VALORES DE  $R_E \sqrt{f} = \frac{d}{\nu} \sqrt{\frac{2g d h_L}{L}}$

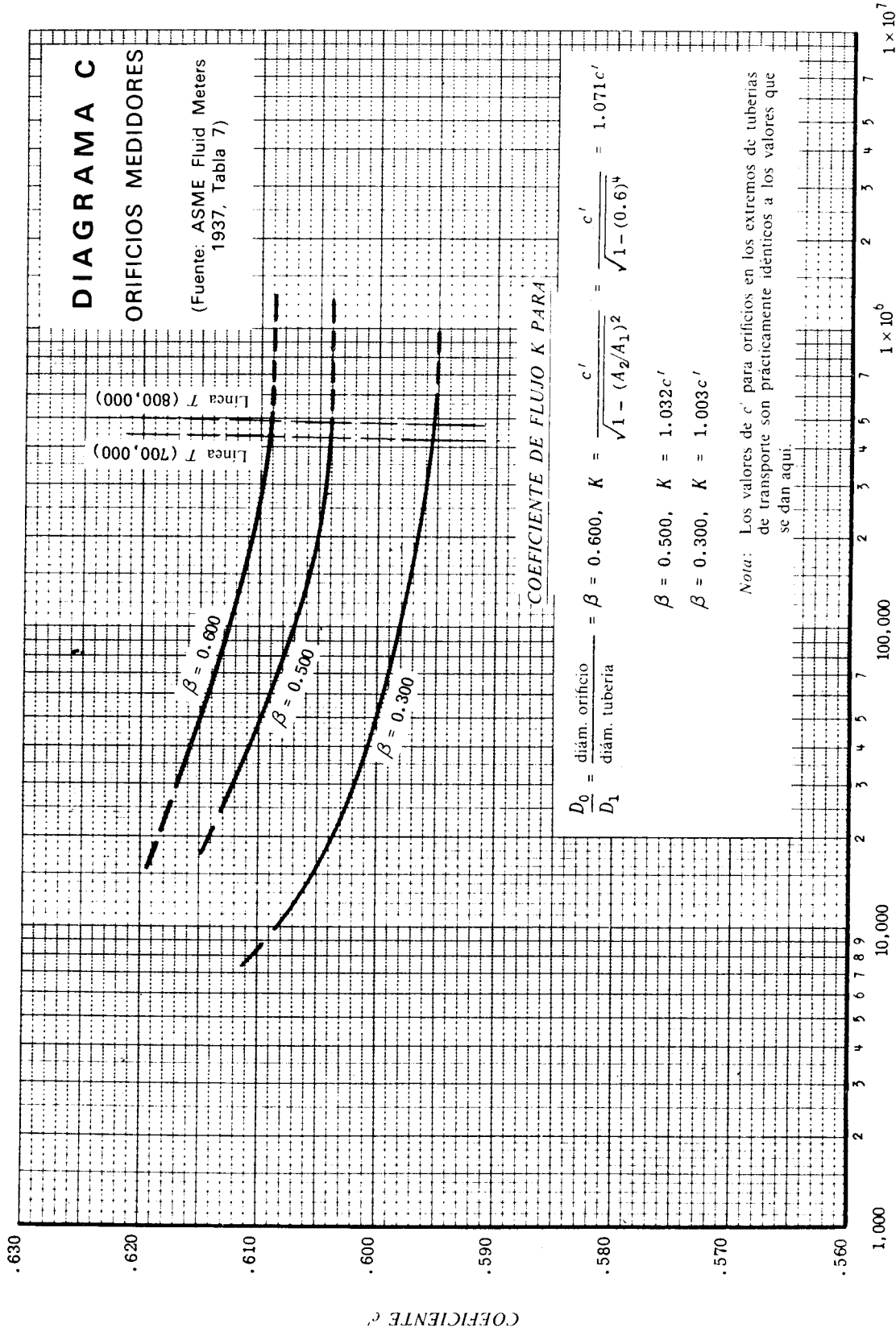
## DIAGRAMA B

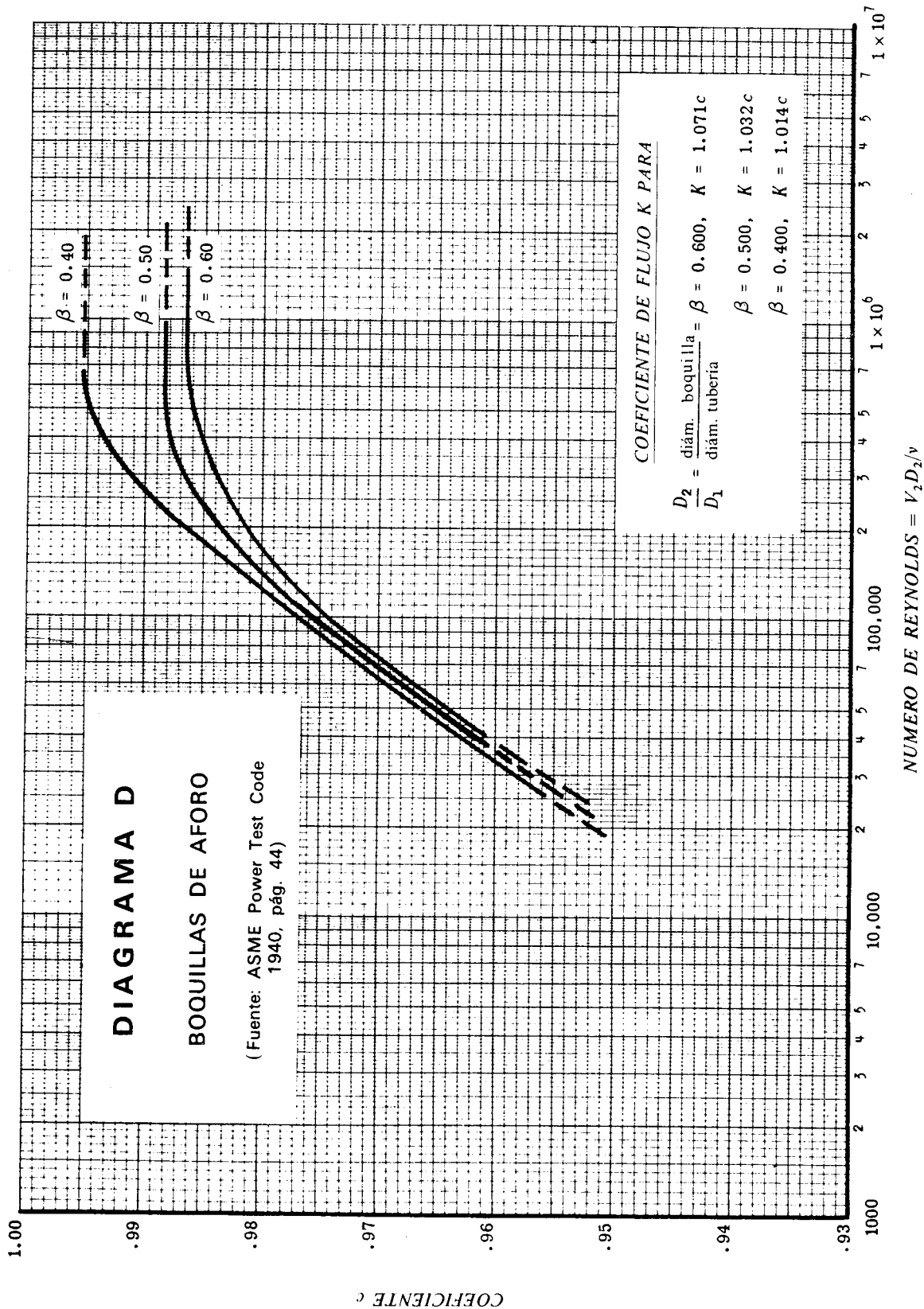
MONOGRAMA DE CAUDALES  
FORMULA DE HAZEN-WILLIAMS,  $C_1 = 100$



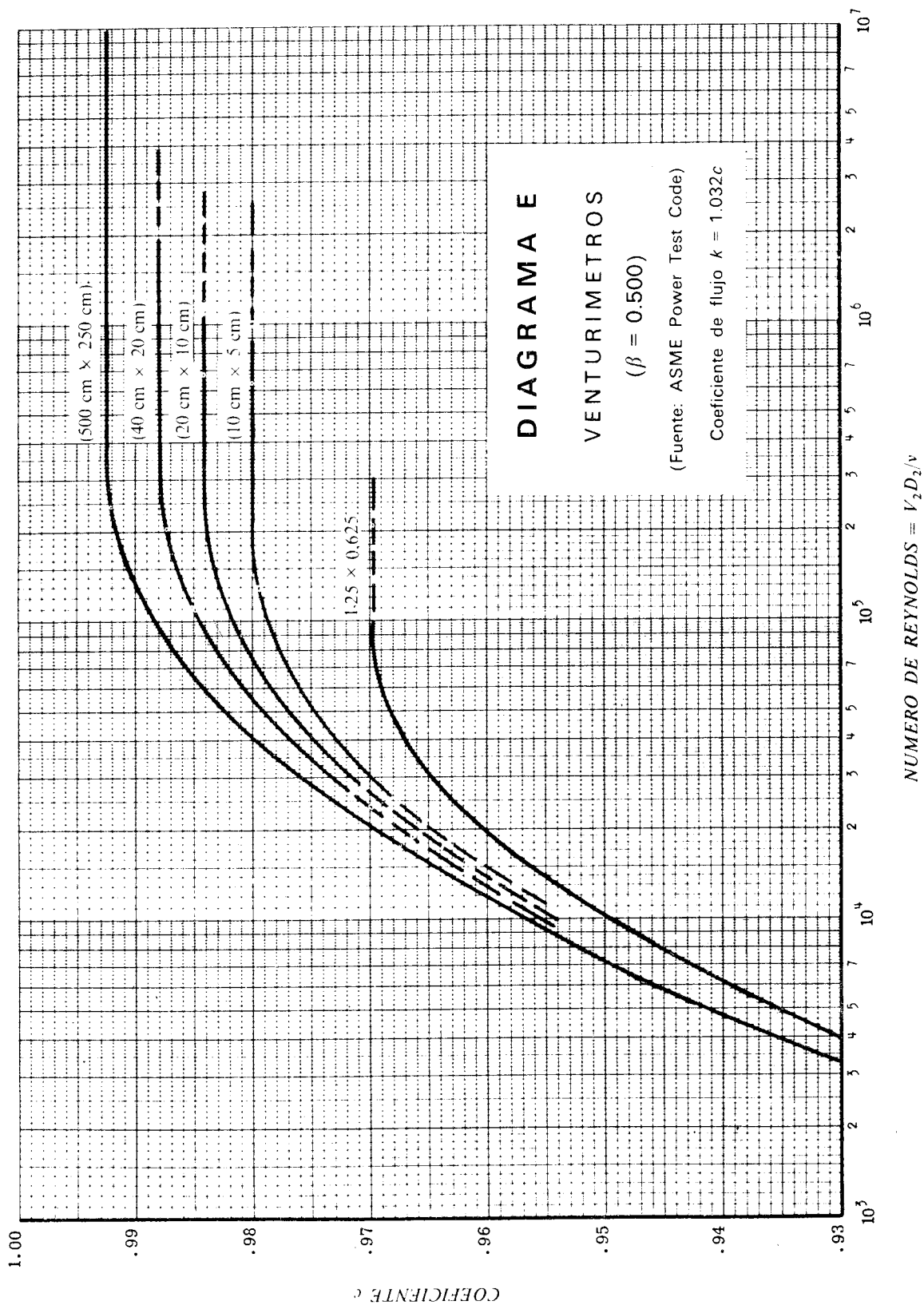
### UTILIZACION DEL MONOGRAMA

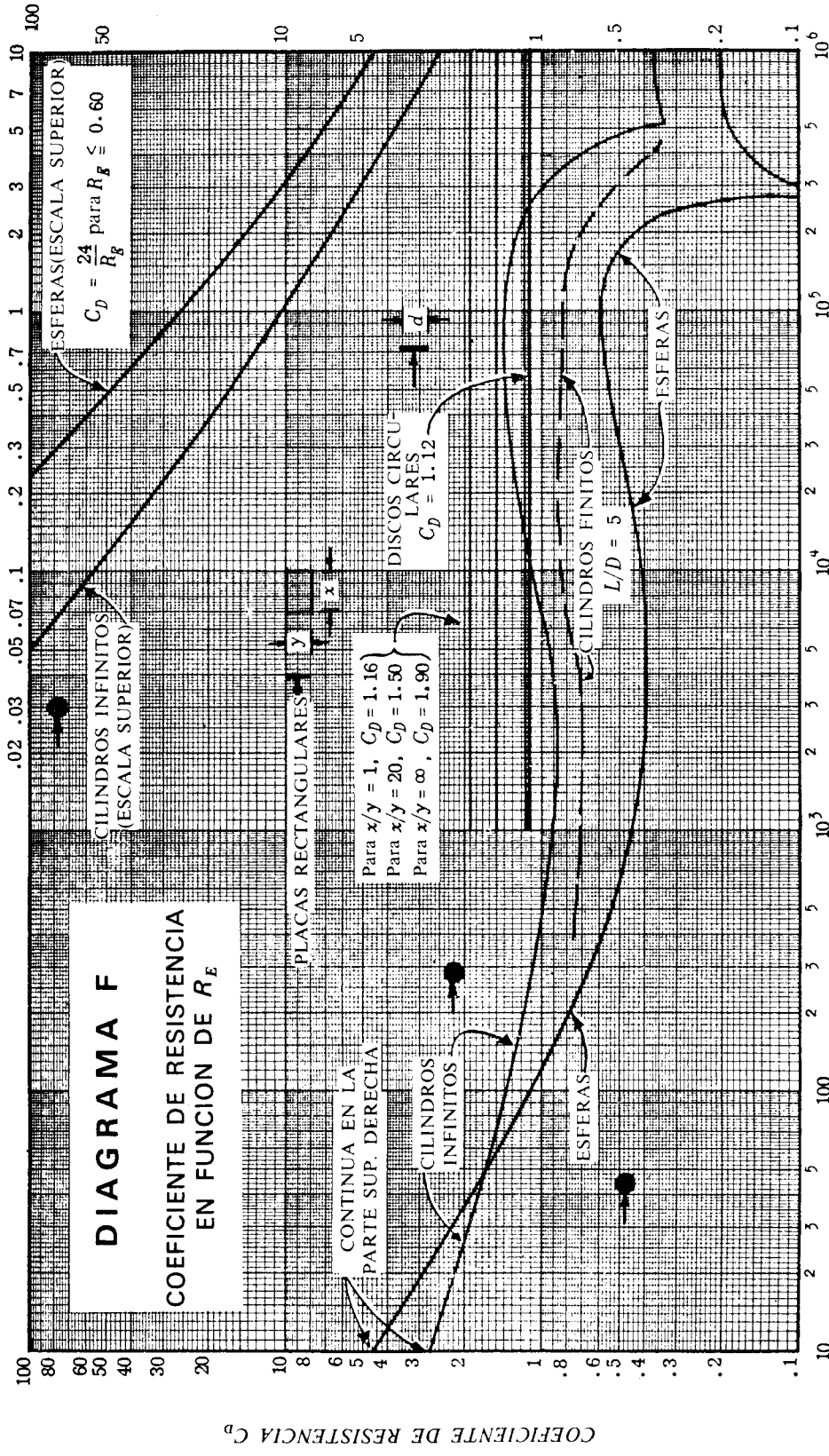
- (1) Dado  $D=60$  cm.,  $S=1.0$  m/1000 m.,  $C_1=120$ ; determinar el caudal  $Q$ .  
El nomograma da  $Q_{100}=170$  l./seg.  
Para  $C_1=120$ ,  $Q = (120/100) 170 = 204$  l./seg.
- (2) Dado  $Q=156$  l./seg.,  $D=60$  cm.,  $C_1=120$ ; determinar la pérdida de carga.  
Cambiando  $Q_{120}$  a  $Q_{100}$ :  $Q_{100} = (100/120) 156 = 130$  l./seg.  
-m- da  $S=0.60$  m./1000 m.







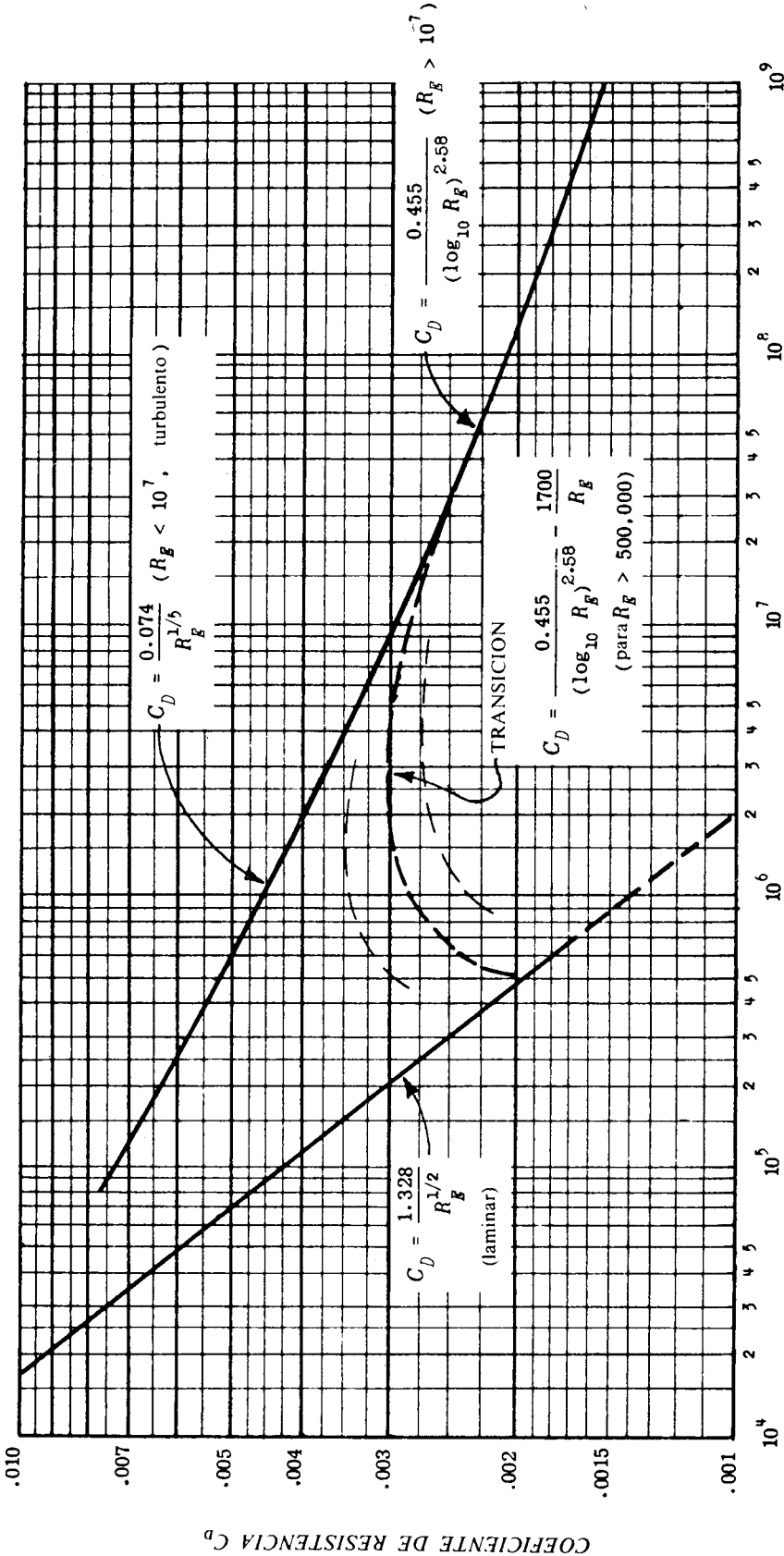




NUMERO DE REYNOLDS ( $VD/v$ )

# DIAGRAMA G

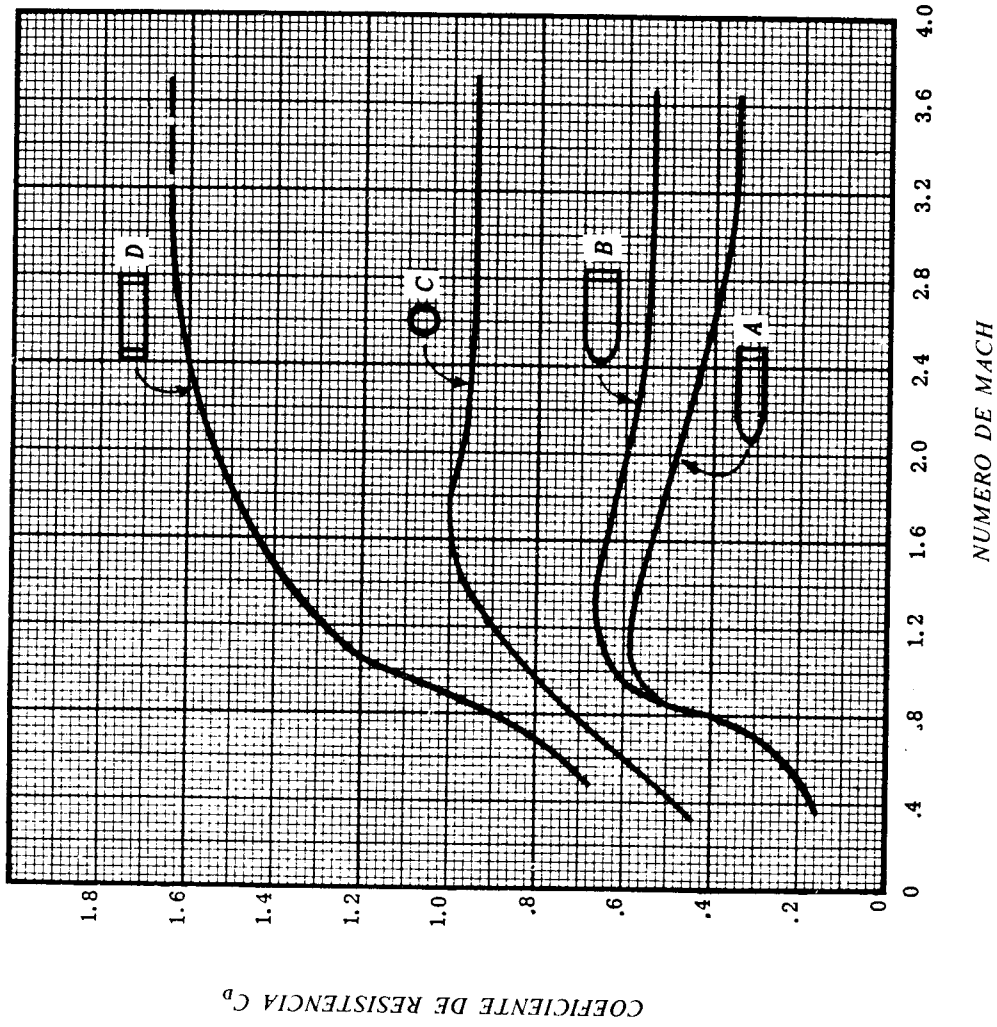
COEFICIENTES DE RESISTENCIA PARA PLACAS PLANAS Y LISAS



NUMERO DE REYNOLDS ( $Vx/\nu$ )

## DIAGRAMA H

COEFICIENTES DE RESISTENCIA A VELOCIDADES SUPERSONICAS





# INDICE

Aceleración lineal, 42-45  
 Adhesión, 4  
 Adrizante, momento, en cuerpos flotantes, 36, 40  
 Agua, ruedas de, 225  
 Aire, propiedades del, 246  
 Altura de carga, de presión, 5, 11-15, 73, 84, 107, 110, 111, 136, 139, 140  
 de velocidad, 73, 84-92, 135, 161, 229, 231  
 desarrollada por bombas, 230, 231, 237, 238  
 decreciente, 152-154  
 desagüe bajo, 152-154  
 elevación o cota topográfica, 73  
 estática, 73  
 pérdida de, 56, 83, 98-100, 102, 249  
 en boquillas, 134, 141, 145, 146, 261  
 en canales abiertos, 161, 178-180, 184, 185  
 en orificios, 134, 139, 140, 249, 260  
 en tuberías, 85, 86, 98-111, 116-129  
 en tubos, 134, 140  
 en venturímetros, 134, 142, 143, 147, 262  
 sobre turbinas, 230, 233-236  
 sobre vertederos, 135, 149-152, 154  
 total, 73, 84, 133, 139, 140  
 Altura de succión de una bomba, 87  
 Análisis dimensional, 50, 67, 207, 213  
 Angulo, de ataque, 194, 209, 210  
 del cono, 196, 221  
 Areas de circulos, 256  
 Arquímedes, principio de, 36  
 Atmósfera, normal, 11

Barómetro, 11  
 Bazin, fórmula del vertedero, 135  
 fórmula para C, 161

Bernoulli, ecuación de, 73, 83-92, 103-109, 136-145, 149, 155, 229, 230, 241  
 Bomba, rendimiento de una, 227, 237-239  
 Bombas, altura desarrollada en, 230, 231, 237, 238  
 caudal unitario, 226, 231, 232  
 curvas altura-caudal en, 238, 240  
 en tuberías de transporte, 87, 106, 121, 240  
 factor de velocidad, 225, 231, 232  
 geoméricamente semejantes, 225-227, 236-240  
 homólogos, 226, 237-240  
 leyes y constantes para, 231-240  
 modelos de, 237, 239  
 pérdida de carga en, 231, 237  
 potencia unitaria, 226, 231, 232  
 relación de velocidad, 225, 237-239  
 velocidad específica, 227, 231, 239  
 velocidad unitaria, 226, 231, 232  
 Boquillas, coeficientes de, 134, 141, 145, 146, 261  
 de aforo, 145-147, 252, 261  
 en tuberías, 134, 141, 145, 146  
 flujo a través de, fluidos compresibles, 145, 146, 252  
 de fluidos incompresibles, 141  
 pérdidas de carga en, 134, 141, 145, 146, 249  
 Boyle, ley de, 2  
 Brusca, contracción, 107, 108, 249, 250  
 Brusco, ensanchamiento, 106, 107, 110, 249, 250  
 Buckingham, teorema de Pi de, 50, 57-61

Canales abiertos, 160-188  
 caudal unitario máximo en, 162, 173-177  
 coeficientes de rugosidad, 161, 163-168, 252  
 curvas de perfil, 177-183

Canales abiertos, de sección circular incompleta, 169, 170  
 distribución de velocidad, 161, 165, 167  
 energía específica, 161, 173-177  
 factores de descarga  $K$  y  $K'$ , 170-172, 254, 255  
 flujo en, crítico, 162, 173-177, 182-188  
 no uniforme, 162, 178-188  
 subcrítico, 162, 173-176  
 supercrítico, 162, 173-176  
 flujo laminar, 160, 161, 164  
 flujo no uniforme en, 160, 162, 177-188  
 flujo normal, 161  
 flujo turbulento, 161-188  
 flujo uniforme, 160, 163-177  
 fórmula de Bazin para, 161  
 fórmula de Chezy para, 160, 163, 166, 168-172  
 fórmula de Kutter para, 160, 168-170, 253  
 fórmula de Manning para, 160, 166-172, 175, 182  
 línea de alturas piezométricas en, 163  
 línea de alturas totales en, 160, 162, 181  
 medidor de caudal, 188  
 pendiente crítica, 174, 175  
 pendiente de, 160-165, 168-172, 175-182  
 pérdidas de carga en, 161, 178-180, 184, 185  
 perfiles, 182, 183  
 profundidad crítica en, 162, 173-177, 182-188  
 radio hidráulico, 160-162, 166-172, 175-181, 185, 186  
 rectangulares, 162-164, 166-170, 173-175, 176-195  
 resalto hidráulico, 163, 183-187  
 sección óptima, 172  
 tensión cortante en, 163-165  
 tramos en, 162, 177, 178  
 trapezoidales, 171, 172, 174-176

- Canales abiertos, velocidad crítica en, 162, 173-177
- Cantidad de movimiento, coeficiente de corrección de la, 192, 196, 197
- ecuación de la, 192
- lineal, 192-207, 240
- momento de la, 228
- variación de la, 192, 197-207, 228, 240
- Capa límite, coeficiente de resistencia, 194, 195, 214-217
- en placas planas, 194, 213-217, 264
- espesor de, 166, 194, 195, 213-217
- laminar, 166, 194, 213-217
- tensión cortante en, 165, 194, 195, 213, 214
- turbulento, 195, 215-217, 264
- Capilaridad, 4, 18
- Cauchy, número de, 52
- Caudal, 70-72
- ideal, 133, 134
- medida de, 133-156
- Cavitación, 141, 227
- Celeridad, 6, 57, 137, 148, 196, 206, 207, 217-221
- Centro, de flotación, 36, 40
- de gravedad, 22-29
- de presión, 22-29
- Cero, presión, 12
- Cilindro, coeficientes de resistencia, 263
- Cinématica, semejanza, 51, 61-67
- viscosidad, 3, 7, 8, 246, 247
- Cinética, energía, 73, 241
- factor de corrección de la, 73, 81, 161
- Cipolletti, vertedero de, 135, 152
- Codos, fuerzas sobre, 202, 203
- pérdidas en, 118, 249
- Coeficiente, de boquillas y toberas, 145-147, 261
- de contracción, 134, 139-141
- de descarga, 133, 139-145, 251, 260-262
- variación con el número de Reynolds, 260-262
- de orificios medidores, 143, 144, 260
- de resistencia, 55, 66, 67, 193-195, 207-217, 263-265
- de rugosidad, 116
- de sustentación, 193, 194, 208-211
- de velocidad, 134, 139-141
- de venturímetros, 134, 142, 143, 147, 262
- Coefficientes de flujo, 142-145, 260-262
- Cohesión, 4
- Colebrook, ecuación de, 99
- Componente horizontal de una fuerza, 22, 29-32
- Componentes de fuerza hidrostática, 22, 29-32
- Compresibilidad, de gases, 5-7, 17
- de líquidos, 5
- Compresión de gases, 5-7, 17
- Condiciones adiabáticas, 5, 7, 145
- Conservación, de energía, 72
- de masa, 70-71
- Contracción de un chorro, 134, 139, 141, 143, 144
- Cortante, tensión, en fluidos, 3, 9, 10, 56, 83, 97, 100-102, 194, 195, 214
- Cortantes, fuerzas, 82, 83, 101
- Cortos, tubos, 140, 153
- Cuerpos sumergidos, empuje hidrostático de, 36-40
- resistencia sobre, 193, 207-218
- Curva de perfil, 177-183
- Charles, ley de, 2
- Chezy, fórmula de, 160, 163, 166, 168-172
- Choque, onda de, 196
- Chorro, contracción de un, 134, 141, 143, 144
- energía de un, 140, 141
- fuerza de un, 197-201, 204, 205
- presión en un, 45, 139, 148
- reacción de un, 204-207
- trayectoria de un, 139
- velocidad de un, 134, 139-141, 143, 148
- Darcy, factor de fricción de, 57, 98, 99, 102-111, 116, 118, 160, 168, 248, 257, 258
- Darcy-Weisbach, fórmula de, 98, 102-111, 116, 118
- Densidad, 2, 6, 246
- Depósitos, tiempo de vaciado de, 66, 136, 152-154
- Diagramas:
- coeficientes de boquillas de aforo, 261
- coeficientes de medidores de orificio, 260
- coeficientes de resistencia, 263-265
- coeficientes de venturímetros, 262
- factor  $f$  de Darcy en función del número de Reynolds, 257, 258
- nomograma de Hazen-Williams, 259
- Diferencia de presión, 4, 12-17, 195, 219, 220
- Dimensiones, 1
- Distribución de velocidades, 73, 81, 97, 101, 161, 165, 167, 197, 213
- Ecuación, de continuidad, 71, 74-77
- de la energía (*véase* Ecuación de Bernoulli)
- Ecuaciones, empíricas para flujo en tuberías, 115
- generales del movimiento, 82, 84
- Elasticidad, módulo de, 5-7, 52, 196, 218-220, 246
- Empuje, 206, 207, 227, 240-243
- del hielo sobre las presas, 29
- hidrostático, 36-40
- hidrostático sobre la base de una presa, 29
- Energía, cinética, 73, 241
- conservación de la, 72
- debida a la presión, 73
- específica, 161, 173-177
- interna, 73
- potencial, 73
- total, 82, 84
- transformación, de la, 84
- Ensanchamiento, brusco, 107, 110, 249
- gradual, 249, 250
- pérdidas, 249, 250
- Esferas, coeficientes de resistencia, 263
- resistencia de, 193, 211, 212, 217, 221
- Específica, energía, 161, 173-177
- velocidad, 226, 227, 231-236, 239
- Específico, calor, 6
- peso, 2, 6, 246
- volumen, 2, 6, 7
- Estabilidad, de cuerpos flotantes, 36, 40
- de cuerpos sumergidos, 36
- Estacionaria, ola, 66
- Estancamiento, presión de, 90, 133, 137, 138, 197
- punto de, 90, 136, 137
- temperatura de, 138
- Estática, presión, 136, 138
- Estela, 242, 243
- Euler, ecuación de, 83
- número de, 51, 64
- Exponente adiabático, 5, 84, 246
- Factores de expansión  $Y$ , 146, 252
- Flotación, 36-40
- centro de, 36, 40

- Fluidos, I  
 propiedades de, 1-19, 246, 247
- Flujo, adiabático, 84, 91, 137-139, 145-149  
 crítico, 96, 100, 162, 173-177, 182-188  
 de fluidos compresibles, 83, 84, 92, 108-110, 137-139, 145-149  
 a través de boquillas de aforo, 145-147, 252  
 a través de orificios, 9, 90, 148  
 a través de secciones convergentes, 145, 147, 148  
 a través de tuberías, 91, 92, 108, 109, 137-139, 145-149  
 a través de venturímetros, 145, 147, 252  
 ecuaciones generales del, 82-84  
 en canales abiertos, 160-188  
 en tuberías, 85-89, 91, 92, 96-111, 116-129, 136-138  
 isotérmico, 83, 92, 108-110  
 laminar, 96, 98-104, 160, 194, 214-217  
 medida de, 133-156  
 neto, 72, 78-81  
 no permanente, 71, 76, 136, 152-156  
 no uniforme, 71, 76, 152-156, 160, 162, 178-188  
 permanente, 71, 74, 77, 82, 85, 89, 91, 96-111, 115-129, 163-167  
 radial, 231  
 sónico, 194  
 subsónico, 194  
 supersónico, 194, 196, 221  
 suponiendo densidad constante, 86, 90, 105, 111, 138, 146  
 tridimensional, 76, 77  
 turbulento, 96, 104-111, 115-129, 195, 215-217  
 uniforme, 70-72, 96-111, 115-129, 160, 163-177
- Francis, fórmula del vertedero de, 135
- Fricción, factores para tuberías, 57, 99, 101-111, 116, 118, 160, 168, 248, 257, 258
- Hazen-Williams, 115-129  
 número de Reynolds y, 99, 101-111, 257, 258  
 tablas de, 248
- Froude, número de, 52, 63, 65-67
- Fteley y Stearns, fórmula del vertedero de, 135
- Fuerza dinámica, 192-212  
 sobre codos en tuberías, 202, 203  
 sobre placas planas, 197-198, 204, 208, 210  
 sobre reductores en tuberías, 202, 203
- Fuerza dinámica, sobre superficies curvas, 192, 197-203
- Fuerzas, componentes horizontales de, 22, 29-32  
 componentes verticales de, 22, 29-32  
 de gravedad, 52, 61-63, 65-67  
 de presión, relación de, 51, 62  
 dinámicas, 192-212  
 elásticas, 52, 61  
 empuje hidrostático, 36-40  
 localización de, 22, 24-29  
 sobre álabes, 199-201  
 sobre áreas, 22-23  
 sobre codos, 202, 203  
 sobre cuerpos flotantes, 36-40  
 sobre placas planas, 197, 198, 204, 208, 210  
 sobre presas, 28, 29  
 sobre reductores, 202, 203  
 sobre superficies curvas, 22, 29-32
- Fundamentos de flujo de fluidos, 70-95
- Gases, compresión de, 5-7, 17  
 definición, I
- flujo de, adiabático, 84, 91, 137, 138, 145-148
- flujo de, densidad constante, 86, 90, 105, 111, 138, 146
- flujo de, isotérmico, 83-92
- pesos específicos de, 2, 5, 246
- viscosidad de, 3, 246
- Giro, de masas líquidas, 42, 45-48  
 en vasijas abiertas, 42, 45, 46  
 en vasijas cerradas, 42, 46-48
- Golpe de ariete, 195, 217-220
- Gradiente, de alturas de presión (véase a continuación, de alturas piezométricas)
- de alturas piezométricas, 74, 84, 89, 106-108, 110, 111, 121, 123, 124, 163
- de alturas totales, 74, 84, 87, 89, 107-110, 160-182, 187, 188
- Hardy Cross, método de, 125-129
- Hazen-Williams, fórmula de, 115  
 diagrama de la, 259  
 empleo de la, 116-129
- Hélice, turbina de, 236
- Hélices, características de las, 227, 240-243  
 coeficientes de las, 227, 242, 243  
 empuje en, 227, 240, 241, 243  
 potencia de entrada en, 57, 227, 243
- Hélices, potencia de salida en, 227, 240, 241, 243  
 relación avance-diámetro, 242
- Hidráulica, I
- Hidrómetro, 37
- Hidrostatica, 22-40
- Impulso, 192, 197-207, 240
- Impulso-cantidad de movimiento, principio del, 192, 197-207, 228, 240
- Inercia-elasticidad, relación de fuerzas de, 52
- Inercia-gravedad, relación de fuerzas de, 52, 63, 65-67
- Inercia-presión, relación de fuerzas de, 51
- Inercia, relación de fuerzas de, 51, 62
- Inercia-tensión superficial, relación de fuerzas de, 52
- Inercia-viscosidad, relación de fuerzas de, 51, 63-65
- Isotérmica, flujo, 83, 92, 108-110
- Isotérmicas, condiciones, 5, 7, 17
- Kutter, coeficiente de, 160, 168-170, 253
- Laminar, capa límite, 166, 194, 213-217  
 flujo, 96, 98-104, 160, 194, 213-217  
 en canales abiertos, 160, 161, 164  
 en capas límites, 194, 213-217  
 en tuberías, 96, 98-104
- Límite, velocidad, 211, 212, 221
- Línea de alturas piezométricas, 56, 74, 84, 89, 106-108, 110, 111, 121, 123, 124, 163
- Línea de corriente, 71, 79, 80
- Líneas, de alturas totales, 74, 84, 87, 89, 107, 108, 110, 111, 160, 162, 181
- equipotenciales, 72, 79, 80
- Líquidos, propiedades de los, 1-19, 246, 247
- Longitudinal, tensión, 23
- Mach, ángulo de, 196, 221  
 número de, 52, 61, 138, 148, 194, 196, 206, 207, 210, 221
- Manning, fórmula de, 160, 166-172, 175-182



- Manómetro diferencial, 13, 15, 16,  
85, 137, 142, 143, 145, 147  
de tubo en U, 12-14
- Máquinas hidráulicas, 225-243
- Máxima, potencial, 200
- Máxima, desagüe, 162, 172
- Mecánica de fluidos, 1
- Media velocidad, 72, 73, 78, 134,  
164-166
- Medidas de flujo de fluidos compresibles, 137, 138, 145-149
- Medidor de flujo crítico, 188
- Medidores, de boquilla, 134, 141,  
145, 146, 252, 261
- de orificio, 143, 144, 260
- Venturi, 85, 134, 142, 143, 145,  
147, 252, 262
- Menores, pérdidas, en tuberías, 107,  
118, 249
- Metacentro, 40
- Modelos y prototipos, 50-52, 61-67,  
236-242
- Módulo de elasticidad, 5-7, 52, 196,  
218-220, 246
- volumétrico, 5-7, 52, 196, 218-  
220, 246
- Mojado, perímetro, en canales abiertos, 163, 164, 167-172, 175-  
181, 185, 186
- en tuberías, 83, 96, 102-111
- Momento, adrizante de cuerpo flotante, 36, 40
- cinético, 228
- Momentos de inercia, 22-29
- Newton, ecuación de, 51
- No permanente, flujo, 71, 76, 152-  
156, 160, 162, 177-188
- No uniforme, flujo, 71, 76, 152-156,  
160, 162, 177-188
- Nominal, potencia, 82, 234-237
- Número de Reynolds crítico, 99,  
100, 216, 217
- Onda, de compresión, 218-220
- de presión, velocidad de la, 6, 137-  
139, 148, 196, 206, 207, 217-221
- Optimización económica de tuberías, 124
- Orificios, 139, 140
- coeficientes de, 133, 139, 251, 260
- desagüe bajo altura de carga decreciente, 152-154
- en flujo compresible, 90, 91, 148
- en tuberías, 143, 144, 260
- medidor de, 143, 144, 260
- pérdidas de carga en, 134, 139,  
140, 249, 260
- Par, 225, 227, 228
- Parabólica, superficie de agua, 45-48
- Paralelo, tuberías en, 115, 119-123,  
125-129
- Pelicular, rozamiento (*véase* Resistencia)
- Pendiente, crítica, 174, 175
- de canales abiertos, 160-165, 168-  
172, 175-182
- de la línea de alturas piezométricas, 56, 74, 89, 106-108, 110,  
111, 121, 123, 124, 163
- de la línea de alturas totales, 74,  
87, 89, 107, 108, 110, 111, 160,  
162, 181
- Pérdida, de energía (*véase* Pérdidas de carga)
- por fricción (*véase* Pérdidas de carga)
- Pérdidas, a la entrada, 108, 110, 249
- a la salida, 106, 118, 231, 249
- de carga, 56, 83, 98-100, 102, 249
- a la entrada, 108, 110, 249
- a la salida, 107, 118, 249
- debidas a codos, 118, 249
- debidas a contracciones, 107,  
249, 250
- debidas a ensanchamientos,  
107, 110, 249, 250
- debidas a válvulas, 110, 118,  
123, 149
- debidas a venturímetros, 134,  
142, 143, 145, 147, 262
- en accesorios, 107, 108, 249
- en boquillas, 134, 141, 145, 146,  
261
- en canales abiertos, 161, 178-  
180, 184, 185
- en flujo compresible, 109
- en flujo laminar, 98
- en orificios, 134, 139, 140, 249,  
260
- en resalto hidráulico, 163, 183-  
187
- en tuberías, 56, 83, 86, 98-100,  
102-111, 116-129
- en tubos, 134, 140
- menores, 107, 118, 249
- otras, 100, 118, 249
- Perfil de ala, 193, 203
- Periférica, factor de velocidad, 225,  
231-237
- Perímetro mojado, 83, 96, 102-111,  
163, 164, 167-172, 175-181, 185,  
186
- Permanente, flujo, 71, 74, 77, 82, 85,  
89, 91, 92, 96-111, 115-129, 163-  
177
- Peso, caudal en, 75, 76, 146, 147
- específico, 2, 6, 246
- Pesos, fluidos, 2
- de tuberías de fundición, 256
- Piezométricos, tubos, 14
- Piezómetro mojado, 83, 96, 102-111,  
163, 164, 167-172, 175-181, 186
- Piezómetros, 14
- Pitot, tubos de, 133, 136-138
- Placas planas, capa límite en, 194,  
195, 213-217
- fuerza dinámica sobre, 197, 198,  
204, 208, 210
- número de Reynolds para, 194,  
195, 214-216
- resistencia de, 193, 194, 208-210,  
211, 213-216, 217
- Planos, superficies, fuerzas sobre,  
22-29
- Poise, 3, 7, 8
- Poiseuille, ecuación de, 98, 102-104
- Potencia, de un chorro, 140, 141
- expresiones de la, 74, 123, 201,  
209, 225-228
- nominal, 82, 234-237
- suministrada a una turbina, 82,  
87, 89, 110, 123, 228-230
- suministrada por una bomba, 87,  
106, 121, 228
- Potencial, energía, 73
- Powell, fórmula de, 161, 167, 168
- Presas, curva de remanso originada por, 177-183
- de gravedad, 29
- empuje hidrostático sobre, 29
- fuerzas sobre, 29
- resalto hidráulico después de, 183-
- Presión, absoluta, 5, 11, 16 [187]
- altura de, 5, 11-15, 73, 84, 107,  
110, 111, 136, 139, 140
- atmosférica, 11
- barométrica, 11
- centro de, 22-29
- crítica, relación de, 148
- de estancamiento, 90, 133, 137,  
138, 197
- de vapor, 3, 87, 141, 246
- de vapor de agua, 3, 87, 141, 246
- diferencia de, 4, 12-17
- dinámica, 54, 197
- en el golpe de ariete, 195, 217-220
- en un chorro, 45, 139, 148
- en un fluido, 4
- energía de, 73
- estática, 136, 138
- manométrica, 4, 11-16
- negativa, 11
- transmisión de, 4
- unitaria, 4, 10-17
- Principio de Arquímedes, 36
- Profundidad, crítica, 162, 173-177,  
182-185

- Profundidad, de flotación, 36-40  
 Propiedades de los fluidos, 10-19, 246, 247  
 Propulsión, a reacción, dispositivos de, 205-207  
     por hélices, 227  
 Prototipo, 50-52, 61-67, 236-242  
 Proyectil, resistencia de un, 221, 265
- Radial, flujo, 231  
 velocidad, 231
- Radio hidráulico, 83, 96, 115, 116, 160-162, 166-172, 175-181, 185, 186
- Reacción, de un chorro, 204-207  
 turbina de, 228-230, 234, 236
- Rectangulares, canales abiertos, 162-164, 166-170, 173-175, 176-185  
 vertederos, 134, 135, 149-151, 154
- Red de tuberías, método de Hardy Cross, 125-129
- Relación, avance-diámetro, 242  
 de presión crítica, 148
- Relaciones, de caudal, 51, 61  
 de fuerza, 51, 52, 61-64  
 de presión, 51, 52, 62  
 de tiempo, 52, 62  
 de velocidad, 51, 61-63
- Relativa, densidad, 2, 36-38, 247  
 velocidad, 193, 198-201, 210, 215, 228, 229, 231, 237
- Rendimiento, en hélices, 241, 243  
 en bombas, 227, 237-239  
 en turbinas, 82, 227, 230, 235, 236
- Resalto hidráulico, 163, 183-187
- Resistencia, 55, 56, 193, 207-217  
 coeficiente de, 66, 67, 193-195, 207-217, 263-265  
 de cuerpos sumergidos (*véase* Resistencia)
- de esferas, 193, 211, 212, 217, 221  
 de forma, 193, 208, 211, 212, 217  
 de placas, 193, 208, 210, 211, 214-217, 264  
 de un perfil, 193
- superficial, 193, 194, 213-217
- Reynolds, número de, 51, 54, 59-67, 96-100, 103-111, 116, 134, 143-147, 166-168, 193-195, 207, 208, 210, 212-217  
 crítico, 96, 100, 216, 217
- Rodete impulsor, 230, 237
- Rodetes, 225-227
- Rozamiento, diagrama para factores de, 257, 258
- Rueda de impulsión, 232-234
- Rugosidad, coeficiente de Kutter, 160, 168-170, 253
- Rugosidad, en canales abiertos, 161, 163-168, 252  
 en tuberías, 56, 60, 99, 104, 115, 116  
 relativa, 56, 60, 115, 116
- Saybolt segundos, 8
- Sección, recta óptima, 172  
 transversal óptima, 172
- Semejanza, cinemática, 51, 61-67  
 dinámica, 51, 52, 61-67  
 geométrica, 50, 61-67, 225-227, 235-240  
 hidráulica, 50-67  
 relación de caudales, 51, 61  
 relación de fuerzas, 51, 52, 61-64  
 relación de presiones, 51, 61  
 relación de tiempos, 52, 62  
 relación de velocidades, 51, 61-63
- leyes de, 50-52, 61-67, 225-228
- Sin contracción, vertederos, 134, 135, 149-151, 154, 177
- Sistemas, de tuberías, 115-129  
 de unidades, 1
- Sonido, velocidad del, 6, 57, 137-139, 147-149, 194, 218-221
- Subcrítico, flujo, 163, 173-176
- Subsónica, velocidad, 194
- Subsónico, flujo, 194
- Succión, altura de, 87
- Supercrítico, flujo, 162, 173-176, 221
- Superficial, resistencia, 193, 214-215  
 tensión, 3, 18, 246
- Superficies curvas, fuerzas dinámicas sobre, 192, 197-203
- fuerzas estáticas sobre, 22, 29-32
- Supersónica, velocidad, 196, 221, 265
- Sustentación, 193, 207-211  
 coeficiente de, 194, 207-211
- Stoke, 3, 7, 8
- T*-líneas en, 144, 260
- Tablas, áreas de círculos, 256  
 coeficientes *C* de Kutter, 253  
 coeficientes *C<sub>i</sub>* de Hazen-Williams, 250  
 coeficientes de desagüe para orificios normales, 251  
 coeficientes de fricción *f* para agua, 248  
 constante de los gases *R*, 246  
 densidad, 246  
 densidad relativa, 247  
 dimensiones de tuberías de fundición, 256
- Tablas, exponentes adiabáticas, 246  
 factores de descarga *K* y *K'*, 254, 255  
 factores de expansión *Y*, 252  
 factores de rugosidad *m* (canales abiertos), 252  
 factores de rugosidad *n* (canales abiertos), 252  
 módulos de elasticidad, 246  
 pérdidas de carga en accesorios, 249  
 en contracciones brutas, 250  
 en ensanchamientos graduales, 250  
 peso específico, 246  
 pesos de tuberías de fundición, 256  
 presiones de vapor, 246  
 tensión superficial, 246  
 viscosidad absoluta, 246  
 viscosidad cinemática, 246, 247  
 viscosidad dinámica, 246
- Tainter, compuerta tipo, 34
- Tamaño de una tubería, mas económica, 124
- requerido, 76, 100, 103, 106, 119
- Temperatura, absoluta (Kelvin), 2, 5, 7  
 de estancamiento, 138
- Tensión en anillos, 22, 32, 219
- Tensiones en tuberías, 22, 23, 32, 219
- Tiempo, necesario para establecer un flujo, 136, 154-156  
 necesario para depósitos, 66, 136, 152-154
- Tiempos, relaciones de, 52, 62
- Total, altura de carga, 73, 84, 133, 139, 140  
 energía, 82, 84
- Transición, en capas límites, 195, 216, 264
- Transmisión de presión, 4
- Trapezoidales, canales abiertos, 171, 172, 174-176  
 vertederos, 135, 152
- Traslación, de masas líquidas, 42-45
- Trayectoria de un chorro, 139
- Triangulares, vertederos, 135, 149-151
- Tuberías, con bombas, 87, 106, 121, 240  
 con boquilla, 134, 141, 145, 146  
 con turbinas, 89, 110, 123  
 de fundición, dimensiones, 256  
 de pesos, 256  
 diagramas de flujo para, 257-259  
 diámetro económico de, 124  
 dimensión requerida para, 76, 100, 103, 106, 119

- Tuberías, distribución de velocidad, en, 97, 98, 101, 102
- en paralelo, 115, 119-123, 125-129
- en serie, 115, 117-119, 121, 122
- equivalentes, 115, 117-120
- espesor de, 32, 219
- factores de fricción para, 57, 99, 101-111, 116, 118, 160, 168, 248, 257, 258
- flujo compresible en, 91, 92, 108-110, 137, 138, 145-149
- flujo en, 85-89, 91, 92, 96-111, 116-129, 136, 137
- flujo laminar en, 96, 98-104
- flujo turbulento en, 96, 97, 99, 104-111
- fórmula de Hazen-Williams, para, 115, 259
- golpe de ariete en, 195, 217-220
- línea de alturas piezométricas en, 56, 74, 84, 89, 106-108, 110, 111, 121, 123, 124, 163
- línea de alturas totales en, 84, 87, 89, 107, 110
- medida de caudal en, por boquilla de aforo, 134
- por orificios, 143, 144, 260
- por tubos de Pitot, 133, 136-138
- por venturímetros, 85, 134, 142, 143, 145, 147, 252, 262
- no circulares, 111
- número de Reynolds  $y f$  para, 99, 103-111, 116, 257, 258
- parcialmente llenas, 169, 170
- pérdidas de carga en, 56, 83, 86, 98-100, 102-111, 116-129
- a la entrada, 108, 110, 249
- a la salida, 107, 118, 249
- debida a codos, 118, 249
- debida a contracciones, 107, 249, 250
- debida a válvulas, 110, 118, 123, 249
- debida a venturímetros, 134, 142, 143, 145, 197, 262
- menores, 107, 118, 249
- radio, hidráulico de, 83, 96, 115, 116, 169
- ramificadas, 115, 123
- relación longitud-dímetro, 107
- rugosidad de, 56, 60, 99, 104, 115, 116
- semejanza entre modelo y prototipo, 50, 51, 61-67, 236, 239, 241
- tensiones en las paredes de, 22, 23, 32, 219
- tiempo necesario para establecer el flujo en, 136, 154-156
- velocidad crítica en, 96, 100
- Turbinas, altura de carga sobre, 230, 233-236
- altura útil, 89, 232, 236
- caudal unitario, 226, 231-235
- de impulsión, 232-234
- de reacción, 228-230, 234, 236
- en tuberías de transporte, 89, 110, 123
- factor de velocidad, 225, 231-235
- geométricamente semejantes, 236
- homólogas, 226, 232, 236
- leyes y constantes, 225-243
- par en el eje, 225, 228
- potencia de entrada, 82, 87, 89, 110, 123, 228-230
- potencia de salida, 230, 232, 235-237
- potencia unitaria, 226, 231-236
- relación de velocidad, 225, 231-235
- rendimiento, 82, 227, 230, 235, 236
- rendimiento hidráulico, 227, 230
- velocidad específica, 226, 231-236
- velocidad óptima, 231, 234
- velocidad unitaria, 226, 231-236
- Tubos, capilares, 18
- cortos, 140, 153
- de corrientes, 71, 79, 80
- de Pitot, 133, 136-138
- piezométricos, 14
- Venturi, 85, 134, 142, 143, 145, 147, 252, 262
- Turbulenta, capa límite, 195, 215-217, 264
- U, manómetro de tubo en, 12-14
- Unidades empleadas, 1, 53
- Uniforme, flujo, 70-92, 96-111, 115-129, 160, 163-177
- Unitaria, presión, 4, 10-17
- velocidad, 226, 231-236
- Unitario, caudal, 78, 161, 173-177
- UTM, I
- V, vertederos en, 135, 149-151
- Válvula, tiempo de cierre de, 195, 217-220
- Válvulas, pérdidas de carga en, 110, 118, 123, 249
- Vapor, de agua, 87, 141, 246
- efecto de cavitación por la, 141, 227
- presión de, 3, 87, 141, 246
- Variable, altura de carga, 152-154
- flujo, 71, 76, 152-156, 160, 162, 177-188
- Variaciones de presión, con la altitud, 5, 12
- en fluidos compresibles, 5, 17
- en líquidos, 4, 12-17
- Vasija, giro de, 42, 45-48
- traslación de, 42-45
- Velocidad, absoluta, 199-201, 237
- altura de, 73, 84-92, 135, 161, 229, 231
- coeficiente de, 134, 139-141
- crítica, 96, 100, 162, 173-177
- en canales abiertos, 173-177
- en tuberías, 96, 100
- de aproximación, 135, 143, 149-151
- de un chorro, 134, 139-141, 143, 148
- de una onda de presión, 6, 137-139, 148, 196, 206, 207, 217-221
- del sonido, 6, 57, 137, 138, 147-149, 194, 196, 206, 207, 217-221
- distribución de, 73, 81, 97, 101, 161, 165, 167, 197, 213
- efecto sobre la altura de velocidad, 73, 161
- en canales abiertos, 160-188
- gradiente de, 3, 8, 9
- ideal, 134, 142
- límite, 211, 212, 221
- media, 72, 73, 78, 134, 160, 164-166
- medida de la, 133, 136-139
- periférica, factor de, 225, 231-237
- relativa, 193, 198-201, 210, 215, 228, 229, 231, 237
- sónica, 6, 57, 137, 138, 147-149, 194, 218-221
- subsónica, 194
- supersónica, 194, 221, 265
- Velocidades, relación de, 51, 62
- Vena contracta, 143, 144
- Venturímetro, 85, 134, 142, 143, 145, 147, 252, 262
- Vertederos, altura de, 135, 151
- altura de carga sobre, 135, 149-152, 154
- con altura de carga decreciente, 154
- con contracción, 134, 135, 151
- de Cipolletti, 135, 152
- de pared gruesa, 163, 187
- factor  $m$ , 135, 136, 150, 151
- fórmulas para, 135
- presas como, 136
- rectangulares, 134, 135, 149-151, 154
- sin contracción, 134, 135, 149-151, 154, 177
- teoría fundamental, 149, 150
- trapezoidales, 135, 152

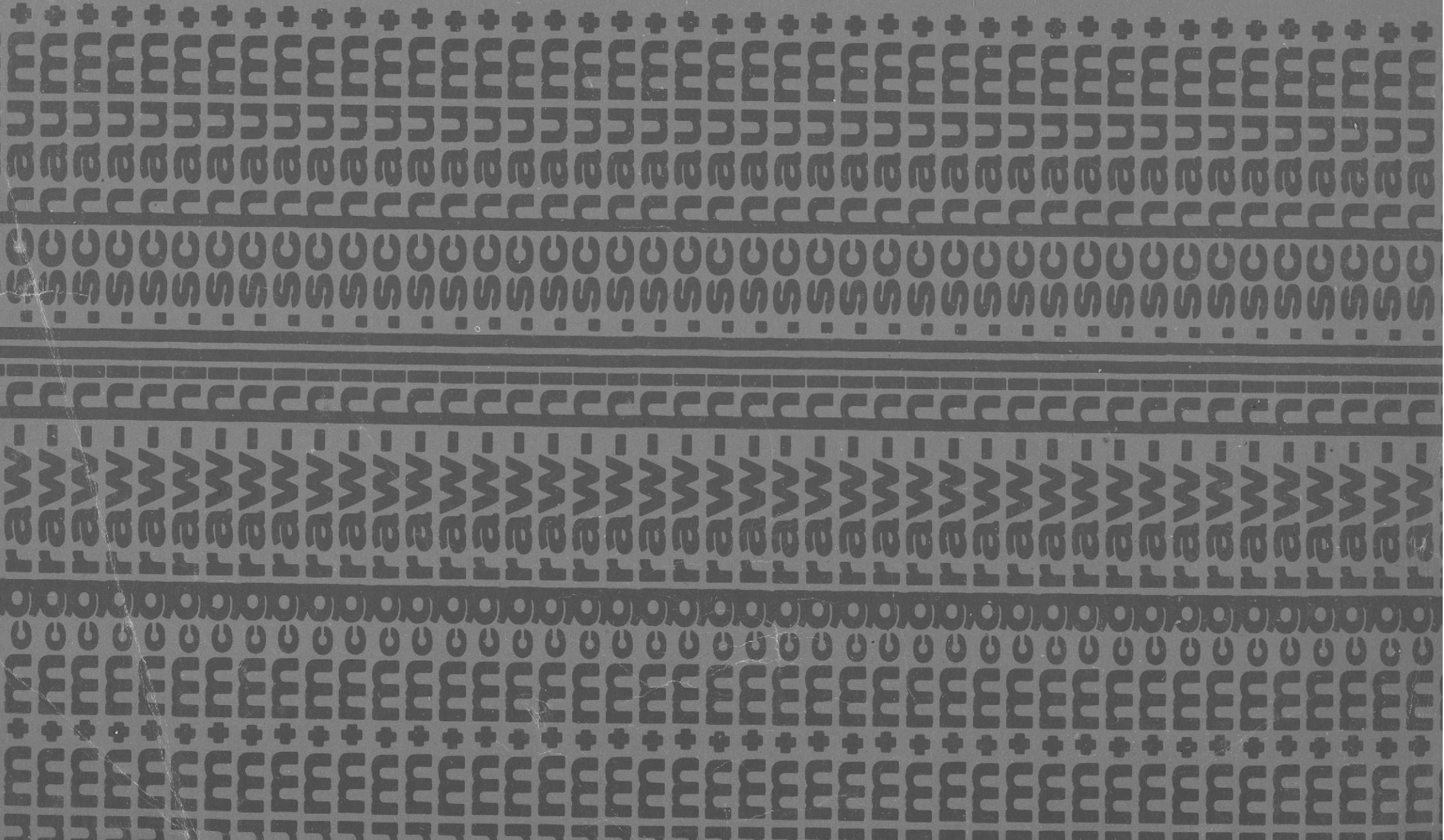
Vertederos, triangulares, 135, 149-151  
 velocidad de aproximación en, 135, 149-151  
 Verticales, componentes, de una fuerza, 22, 29-32  
 Vértice forzado, 42, 45-48

Viscosidad, 2, 3, 7-10, 212, 246  
 absoluta, 3, 8, 10, 212, 246  
 cinemática, 3, 7, 246, 247  
 de algunos líquidos, 246, 247  
 del agua, 246, 247  
 dinámica, 3, 8-10, 212, 246  
 fuerzas de, 32, 63-65, 67

Viscosidad, unidades de, 3, 7, 8  
 Volumen específico, 2, 6, 7

Weber, número de, 52

Y, factor de expansión, 146, 252



Mc  
Graw  
Hill

0-07-091575-X